

RANCANG BANGUN SISTEM INSTRUMEN SPEKTROSKOPI IMPEDANSI ELEKTROKIMIA DENGAN SUMBER SINYAL FREKUENSI TEGANGAN PADA MODE SWEEP

Prayander Sahatma Siahaan
Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas
Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
siahaanryan@student.telkomuniversity.
ac.id

Indra Wahyudhin Fathonah
Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas
Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
indrafathonah@telkomuniversity.ac.id

Rahmat Awaludin Salam
Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas
Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
awaludinsalam@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Spektroskopi Impedansi Elektrokimia (EIS) adalah teknik pengukuran yang menganalisis reaksi elektrokimia melalui aliran sinyal pada elektroda. Analisis hubungan antara sinyal perturbasi dan respons menghasilkan Impedansi. Dalam penelitian ini, dibuat alat EIS dengan sumber sinyal dari modul *Function Generator* AD9833 DDS yang menghasilkan sinyal sinusoidal. Sinyal ini disalurkan ke potensiostat untuk mengondisikan dan menerima respons sistem elektrokimia. Raspberry Pi 4 Model B mengendalikan osiloskop GDS-1102A-U dan modul AD9833 DDS. Fungsi osiloskop GDS-1102A-U ini sebagai pengambilan akuisi data. Data bilangan imajiner dari setiap sinyal ditemukan dengan Fast Fourier Transform (FFT). Hukum Ohm digunakan untuk menghitung Impedansi kompleks dengan membagi sinyal perturbasi tegangan dan respons arus dalam bentuk bilangan kompleks. Hasilnya direpresentasikan dalam Nyquist Plot. Regresi linear menunjukkan hubungan yang kuat antara frekuensi input dan output dengan koefisien korelasi 99,99894% dan koefisien determinansi 99,97880112%. *Error* pengukuran awal sebesar 1,690281212% turun menjadi 1,43350009107172%. Hubungan yang kuat juga ditemukan antara nilai Impedansi dan komponen real dengan koefisien korelasi 92,43833129% dan koefisien determinansi 85,44845092%. *Error* awal 243,9793474% berkurang menjadi 8,837180343%. Sementara pada komponen imajiner, korelasi antara pengukuran dan nilai teoritis mencapai 71,72450153% dengan koefisien determinansi 51,4440412%. Setelah regresi linear, *error* pengukuran turun dari 227,5960622% menjadi 35,96855878%.

Kata kunci—Spektroskopi Impedansi Elektrokimia, Tegangan, Frekuensi, Randles Circuit

I. PENDAHULUAN

Spektroskopi Impedansi Elektrokimia (EIS) adalah teknik karakterisasi sel elektrokimia melalui pengukuran impedansi. EIS memberikan data kinetik dan mekanik pada berbagai sistem elektrokimia, termasuk korosi, semikonduktor, sensor kimia, dan biosensor (Lazanas & Prodromidis, 2023). Namun, biaya instrumen EIS sering

menjadi kendala. Beberapa penelitian mencoba mengatasi masalah ini dengan membuat instrumen sendiri. Rahman menggunakan osiloskop dan function generator untuk fabrikasi potensiostat, meskipun belum otomatis (Rahman et al., 2021). Penelitian terbaru oleh Hendrawan memanfaatkan sinyal segitiga dari function generator dan mengakuisisi data otomatis dari osiloskop menggunakan komputer (Hendrawan et al., 2023). Penelitian sebelumnya menggunakan osiloskop GDS-1102A-U. Penelitian Rahman menyimpan data di flashdisk, sementara Hendrawan memprogram osiloskop melalui USB (Hendrawan et al., 2023; Rahman et al., 2021). Dalam Tugas Akhir ini, kami mengintegrasikan osiloskop untuk akuisisi data otomatis dan AD9833 DDS untuk pencuplikan sinyal sinusoidal otomatis melalui SPI.

II. KAJIAN TEORI

A. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) adalah teknik pengukuran impedansi pada sel Elektrokimia dengan penerapan sinyal AC dengan amplitudo kecil dan berbagai frekuensi pada sistem elektrokimia. Respons sistem terhadap sinyal ini mengungkapkan informasi tentang hambatan, kapasitansi, dan kinerja reaksi elektrokimia. Pengukuran EIS bergantung pada teori matematika kompleks yang dikembangkan oleh Oliver Heaviside pada abad ke-19, yang memperkenalkan konsep *Operational Impedance* sebagai rasio kompleks antara tegangan dan arus dalam rangkaian AC (Randviir & Banks, 2013). EIS menjadi alat penting dalam penelitian elektrokimia modern karena memungkinkan eksplorasi respons sistem pada berbagai frekuensi, membantu pemahaman reaksi elektrokimia, serta mendukung perancangan sistem yang lebih efisien. Sebagai alat analisis, EIS memainkan peran kunci dalam eksplorasi dan pemahaman dunia elektrokimia.,

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \quad (1)$$

Dimana Z merupakan impedansi, V merupakan tegangan, I merupakan arus, j merupakan komponen imajiner dan ω merupakan frekuensi (Bard & Faulkner, 2001; Randviir & Banks, 2013). Bentuk kompleks dari Z ini bisa di buat kedalam bentuk,

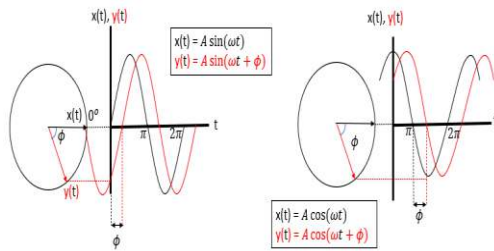
$$Z = a + jb \quad (2)$$

B. Sinyal Pertubasi

Sinyal pertubasi ini merupakan, sinyal yang digunakan sebagai masukan kedalam sistem elektrokimia. Sumber sinyal yang biasa digunakan adalah sumber sinyal AC (tegangan / arus) dimana pola nya sinusoidal (Lazanas & Prodromidis, 2023; Randviir & Banks, 2013),

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

A merupakan amplitudo, ω yang dituliskan $2\pi f$ merupakan frekuensi dari gelombang beserta t untuk waktu tiap titik gelombang. Untuk kasus pengukuran EIS ini, jika kita memasukan sinyal pertubasi sinusoidal kedalam rangkaian ekuivalensi maka sinyal rangkaian itu merespon dengan pola yang sama dengan sinyal yang kita masukan tetapi ada perbedaan pada besar amplitudo maupun besar *phase shift* (ϕ) pada gelombang tersebut, tergantung pada rangkaian ekuivalensi tersebut (Lazanas & Prodromidis, 2023). Hal ini dijelaskan pada gambar 1(A)



GAMBAR 1

Pada penelitian ini, teori gelombang sinusoidal bisa digunakan untuk menyelesaikan permasalahan terkait impedansi. Perbedaan fase antar gelombang sinyal pertubasi dengan respon digunakan sebagai komponen untuk mencari nilai impedansi dalam bentuk kompleks. Hubungan impedansi seperti yang dijelaskan diatas, bisa dijelaskan dalam teori fasor gelombang sinusoidal. Seperti diketahui pada persamaan 2.2 dimana, impedansi dalam bentuk bilangan kompleks memiliki komponen *Real* (Re) dan *Imajiner* (Im) (Lazanas & Prodromidis, 2023). Sehingga bisa dituliskan dengan persamaan (4) dibawah

$$z = |z|(\cos \phi + j \sin \phi) \quad (4)$$

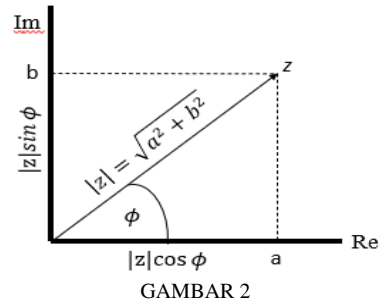
Dimana,

$$a = |z|\cos \phi \text{ dan } b = |z|\sin \phi \quad (5)$$

Sehingga, $|z|$ yang merupakan impedansi tadi bisa kita cari dengan theorema Pythagoras antara komponen real dan komponen imajiner. Maka, kita bisa tuliskan kedalam persamaan,

$$|z| = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \quad (6)$$

Bilamana digambarkan kedalam diagram fasor seperti gambar dibawah,



GAMBAR 2

Sehingga, hubungan *phase shift* (ϕ) dengan setiap komponen pada impedansi adalah,

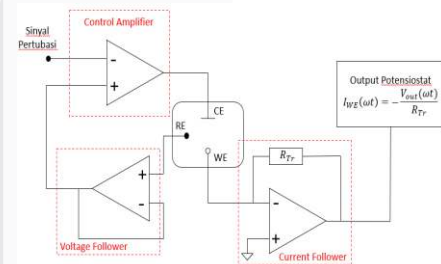
$$\tan(\phi) = \frac{b}{a} = \frac{\text{Im}|z|}{\text{Re}|z|} \quad (7)$$

Dari hubungan diatas, kita bisa mencari *phase shift* (ϕ) dengan cara,

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}|z|}{\text{Re}|z|}\right) \quad (8)$$

C. Potensiostat

Potensiostat merupakan intrumen yang sangat penting dalam menganalisis elektrokimia. Potensiostat pada pengukuran EIS digunakan untuk mempertahankan nilai potensial, atau memberikan potensial dalam keadaan konstan (Shakya, 1998). Dimana nilai yang harus konstan tersebut antara Elektroda Kerja (*Working Electrode*) dan Elektroda Pembanding (*Reference Electrode*) (Shakya, 1998). Potensiostat ini digunakan dalam mempelajari proses reaksi reduksi-oksidasi pada level terkecil / molekuler (Arévalo-ramírez et al., 2016). Berikut merupakan diagram potensiostat yang ada pada gambar 2(A) berikut,



GAMBAR 2

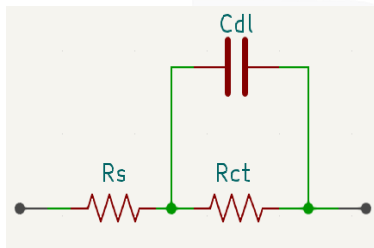
Sinyal yang keluar dari penguat / *amplifier* yang disebut dengan *Control Amplifier* akan masuk kedalam sel elektrokimia melalui *counter electrode* (CE) dan memastikan bahwa arus tidak mengalir pada elektroda *reference* sehingga tidak mempengaruhi potensialnya (Busono et al., 2018). Sinyal yang mengalir pada *Working Electrode* (WE) merupakan respon yang akan dianalisis dan tempat dimana reaksi berlangsung (Alavi et al., 2017; Vyas et al., 2010). Elektroda WE diberikan *current follower* berfungsi untuk mengubah arus yang dihasilkan dari reaksi di WE menjadi tegangan (Sepúlveda et al., 2017). Sedangkan *Reference Electrode* (RE) berfungsi sebagai *sense* dari elektroda WE

yang akan diumpan balik ke kaki negatif *amplifier* sebagai pembanding antara kaki positif *amplifier* (Harrar, 2013). RE sendiri harus memiliki tegangan potensial yang tetap, sehingga diberikan *voltage follower* untuk mengukur antara elektroda kerja dengan elektroda referensi (Busono et al., 2018; Sepúlveda et al., 2017)

D. Randles Circuit

Randles Circuit merupakan rangkaian yang digunakan sebagai model dari suatu reaksi reduksi-oksidasi yang terjadi antara elektroda dengan sel elektrokimia yang diuji dalam pengukuran EIS (Alavi et al., 2017; Vyas et al., 2010). *Randles Circuit* juga merupakan bentuk yang setara untuk *rapid reactions* pada elektroda secara kinetis (Alavi et al., 2017). *Randles Circuit* ini juga disebut sebagai *Faradaic EIS*, ketika ditengah kehadiran reaksi reduksi-oksidasi (redox) dengan memberikan sinyal sinusoidal dengan amplitudo kecil (Lazanas & Prodromidis, 2023).

Dimana reaksi reduksi melepaskan electron dan reaksi oksidasi menerima elektron (Lazanas & Prodromidis, 2023). Pada penelitian ini, penggunaan *randles cell* bertujuan memodelkan sel elektrokimia ke dalam suatu rangkaian listrik. Pemodelan ini juga bertujuan agar bisa menemukan nilai teoritis untuk dijadikan acuan dari nilai ukur yang didapatkan dari pengukuran (Macdonald & Wiley, n.d.). Seperti pada model pada rangkaian dibawah ini.



GAMBAR 3

Setiap komponen yang dirangkai merupakan perumpamaan proses reaksi yang terjadi pada sel elektrokimia dengan elektroda milik potensiostat (Sepúlveda et al., 2017). R_s yang merupakan representasi dari resistansi yang dimiliki setiap sel elektrokimia, R_{ct} yang merupakan *polarization resistance* atau *charge-transfer* yang dikarenakan R_{ct} dialiri oleh arus $I_{R_{ct}}$ yang terbagi pada percabangan setelah R_s (Sepúlveda et al., 2017). Sedangkan kapasitor C_{dl} merupakan kapasitansi *double layer*. Impedansi bisa dicari nilai aslinya, dengan menganalisis rangkaian *Randles Circuit* ini. Dimana bentuk persamaan analisis untuk menemukan nilai real dan imajiner-nya dari adalah,

$$Z = \frac{R_p + R_s + (\omega R_p C_p)^2 R_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} + j \frac{-\omega R_p^2 C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \quad (9)$$

dimana untuk nilai real ($Z_{re} / Re |Z| / Z'$) sebesar,

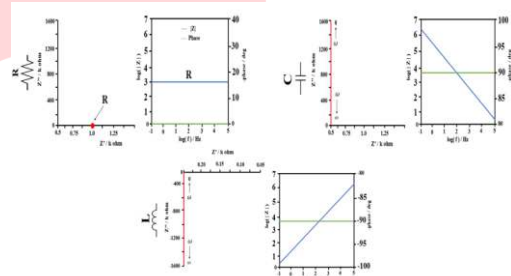
$$\frac{R_p + R_s + (\omega R_p C_p)^2 R_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \quad (10)$$

dan nilai imajiner nya ($Z_{im} / Im |Z| / Z''$) sebesar,

$$\frac{-\omega R_p^2 C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \quad (11)$$

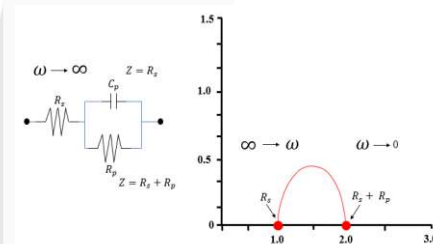
E. Nyquist Plot

Nyquist Plot pada pengukuran EIS, merupakan visualisasi data impedansi yang diperoleh dalam bentuk *plot* antara impedansi imajiner dan impedansi real, sedangkan *Bode Plot* merupakan visualisasi data antara frekuensi yang diterapkan terhadap *phase shift* () atau perbedaan sudut antara sinyal pertubasi masuk dengan sinyal respon dari ojek uji (Cheng & Chen, 2013; Mahdavian & Attar, 2006). Bentuk Nyquist Plot dan Bode Plot biasa dipengaruhi oleh susunan dari *Randles Circuit* merujuk pada model yang setara dengan sel elektrokimia. *Randles Circuit* ini dibuat dari kombinasi rangkaian RLC dan setiap bagian baik Hambatan, kapasitansi dan induktansinya memiliki bentuk dari *Nyquist Plot* dan *Bode Plot* nya masing-masing (Lazanas & Prodromidis, 2023). Nyquist Plot dan bode plot setiap komponen RLC digambarkan pada gambar 4 dibawah,



GAMBAR 4.

Pada penelitian ini, akan dirangkai suatu rangkaian listrik yang akan menjadi *Randles Circuit* yang merupakan rangkaian RC (Resistor-Kapasitor). Bentuk rangkaian yang akan diuji ada pada gambar 5. Dengan menggunakan persamaan (10) dan persamaan sebelas (11) maka akan didapatkan bentuk *Nyquist Plot* seperti,



GAMBAR 5

Frekuensi yang diterapkan semakin mendekati nilai 0 atau kecil maka, aproksimasi nilai impedansi real yang didapatkan adalah akan mendekati hasil penjumlahan R_s dengan R_p . Begitu juga sebaliknya, jika nilai frekuensi nya tinggi hingga mendekati tak hingga maka aproksimasi nilai impedansi real nya akan mendekati nilai dari R_s .

F. Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) adalah salah satu cara untuk menyelesaikan kasus dari *Discrete Fourier Transform*. Sebagai bagian dari Algoritma komputer, *Fast Fourier Transform* banyak membuka jalan baru dalam

penyelidikan terkait ilmu pengetahuan (Brigham & Morrow, 1967). Pada penelitian melibatkan pengukuran EIS, metode FFT sangat umum digunakan dalam menganalisis Frekuensi yang bergantung pada impedansi (Popkirov & Schindler, 1992). Dalam mengolah data masukan dan keluaran sinyal pertubasi pengukuran EIS yang berbasis domain waktu, algoritma FFT mengubahnya menjadi data berdomain frekuensi (Popkirov & Schindler, 1992). Dimana perhitungan impedansi nya merupakan perhitungan dalam bentuk bilangan kompleks pada setiap frekuensi yang telah diterapkan (Popkirov & Schindler, 1992).

Persamaan FFT nya dituliskan kedalamke bentuk notasi sigma / bentuk diskrit yakni,

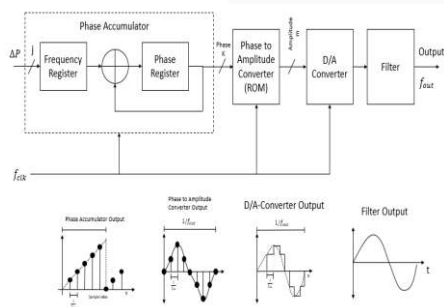
$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{-\frac{2\pi kn}{N}} \quad (13)$$

dengan bentuk *inverse* nya,

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{\frac{2\pi kn}{N}} \quad (14)$$

G. Direct Digital Synthesizer (DDS)

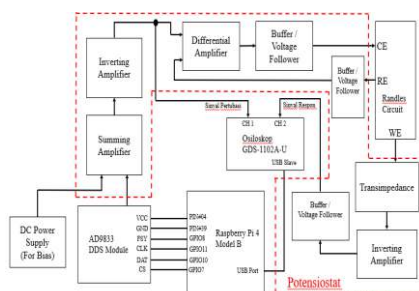
Direct Digital Synthesizer (DDS) merupakan, Teknik pemrosesan sinyal dengan memanfaatkan pemrosesan data digital dengan memanfaatkan blok untuk menghasilkan frekuensi dan fase yang dapat diatur sebagai referensi ke sumber *clock* presisi frekuensi yang tetap (Mandaliya et al., 2013). Komponen DDS terdiri atas *phase accumulator*, *waveform storage* ROM, D/A *converter* atau dikenali dengan *Low Pass Filter* (LPF) (Chen & Liang, 2018). Cara kerja dari DDS ini digambarkan pada cara kerja dibawah.



GAMBAR 6

III. METODE

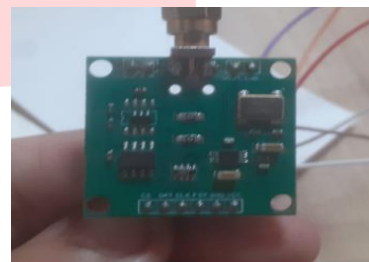
A. Desain Sistem



GAMBAR 7

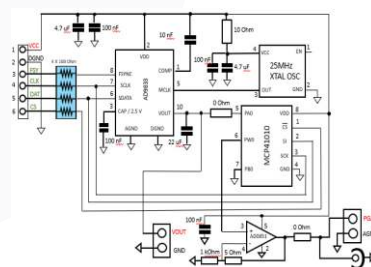
Pada gambar 7 menjelaskan diagram sistem dari penelitian yang dilakukan. Dimulai dengan mikrokomputer memerintahkan untuk mencuplik sinyal pertubasi dari *Function Generator* dengan cara diprogram melalui mikrokomputer Raspberry Pi 4 Model B yang terkoneksi langsung dengan Modul AD9833 DDS dengan jalur komunikasi *Serial Pheripheral Interface* (SPI).

Modul AD9833 merupakan modul yang akan digunakan sebagai *Function Generator* pada instrumen pengukuran EIS ini. Modul AD9833 sendiri sebagai bentuk kombinasi antara *Integrated Circuit* (IC) berjenis AD9833 dengan beberapa IC lain yang berfungsi menghasilkan sinyal pertubasi yang diinginkan. Modul AD9833 bekerja secara dengan system *Direct Digital Synthetizer* (DDS), dimana memasukkan frekuensi *word* untuk mengeluarkan gelombang (Analog Devices, 2019). Bentuk dari Modul AD9833 DDS ini ditampilkan pada gambar 9,



GAMBAR 9

Modul AD9833 tidak hanya soal IC AD9833. Pada dasarnya, IC AD9833 memerlukan satu referensi *clock*, satu resistor dengan presisi rendah dan *decoupling capacitor* untuk bisa menghasilkan gelombang hingga 12,5 MHz (Analog Devices, 2019). Modul AD9833 memiliki beberapa IC penunjang yang memiliki fungsi berbeda. Contohnya, seperti IC MCP41010 yang merupakan *Digital Potensiometer* dan AD8051 sebagai *Operational Amplifier*. Berikut merupakan diagram arsitektur dari Modul AD9833 DDS.



GAMBAR 10

Lalu, sinyal perturbasi ini masuk kedalam rangkaian Potensiostat, yang terdiri atas satu rangkaian *Summing Amplifier*, dua rangkaian *Inverting Amplifier*, satu rangkaian *Differential Amplifier*, satu rangkaian *Transimpedance* dan *Voltage Follower*. *Summing Amplifier* berfungsi untuk menumpangkan sinyal perturbasi pada sinyal DC. Lalu, *Inverting amplifier* berfungsi untuk melakukan *coupling* / pembalikan tegangan *Summing Amplifier* yang negatif menjadi positif. Sinyal tersebut masuk kepada rangkaian *Differential Amplifier*. Lalu, sinyal perturbasi akan mengalir pada elektroda sel elektrokimia.

Elektroda CE dipasang sebelum masuk kedalam *Randles Circuit*. Elektroda WE dan RE dipasang paralel setelah keluar dari *Randles Circuit*. Elektroda RE mengalirkan tegangan referensi yang akan masuk ke *Voltage Follower* dan akan masuk kembali ke *Differential Amplifier* pada kaki positif. Pada elektroda RE dialirkan sinyal respon dari *Randles Cell* yang akan masuk kembali ke Potensiostat dan masuk pada rangkaian *Transimpedance / Current Follower* untuk *converting* dari arus ke tegangan. Lalu, masuk ke *Inverting* dan *Voltage Follower* yang berfungsi sebagai pengkondisi sinyal untuk masuk ke Osiloskop GDS-1102A-U yang menjadi perangkat akuisisi data.

Penggunaan osiloskop ini juga karena, osiloskop ini sendiri memiliki USB *slave port* dimana jika kita hubungkan ke USB *master* di komputer, maka bisa mengendalikan osiloskop tersebut lewat program [29][30]. Dengan beberapa perintah yang telah disediakan, bisa dilakukan pengambilan data *waveform* tersebut. Berikut merupakan gambar dari osiloskop GDS-1102A-U



GAMBAR 11

Lalu, mikrokomputer Raspberry Pi 4 Model B memerintahkan Osiloskop melalui komunikasi via USB *port*, untuk melakukan akusisi data *waveform* yang ditangkap di Osiloskop. Data yang telah diakusisi dimasukan diolah oleh mikrokomputer sehingga bisa didapatkan *Nyquist* atau *Bode Plot*-nya.



GAMBAR 12

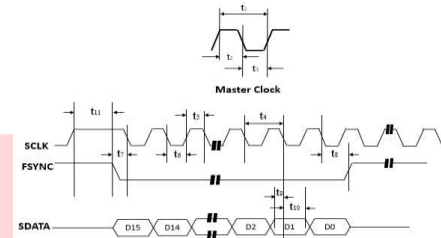
Sinyal pertubasi ditumpangkan pada, listrik DC dengan *supply* dari DC *Power Supply*. DC *Power Supply* ini merupakan alat eksternal diluar dari Instrumen EIS. Dimana DC *Power Supply* in berfungsi untuk memberikan DC *Bias* pada Potensiostat.



GAMBAR 13

B. Desain Perangkat lunak

AD9833 berkomunikasi dan bertukar data dengan mikrokomputer melalui jalur SPI. Data frekuensi yang diinginkan dibuat kedalam bentuk 16-bit *word* dibawah kontrol SCLK (Analog Devices, 2019). Pada AD9833, *port* FSYNC berfungsi sebagai masukan yang dipicu karena adanya tingkatan yang berperan sebagai *frame synchronization* dan *chip enable* (Analog Devices, 2019). Dalam pengiriman data, FSYNC harus dalam keadaan *low* seperti t_7 jika mengikuti pada *timing* diagram dibawah,



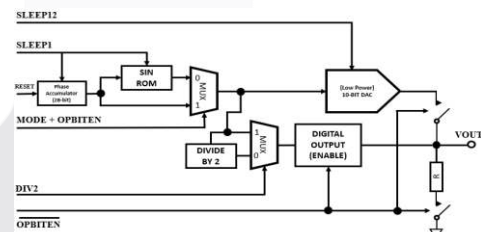
GAMBAR 13

Lalu, data *serial word* disisipkan masuk ke register selama fase *falling edge* dengan waktu 16 pulsa *clock*. FSYNC kembali *high* setelah *falling edge* ke-16, melihat *timing diagram* pada t_8 . AD9833 bekerja dengan register 16-bit. Mengenai register tersebut bisa dijelaskan pada gambar berikut,

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	B28	HLB	FSELECT	PSELECT	0	RESET	SLEEP1	SLEEP12	OPBITEN	0	DIV2	0	MODE	0

GAMBAR 14

Register diatas memiliki bekerja sesuai dengan penjelasan pada gambar berikut,



GAMBAR 12.

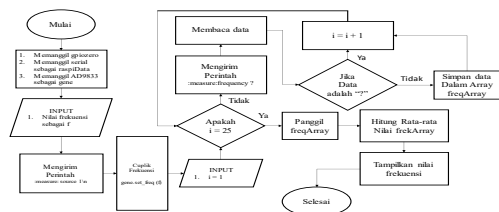
Lalu, untuk Osiloskop GDS-1102A-U yang juga dikontrol pada osiloskop bisa diprogram dengan komputer, asalkan ada sambungan USB dimana kabel USB terpasang pada *port* USB pada komputer dan satunya lagi terpasang pada USB type B *slave* milik GDS-1102A-U. USB type B *slave* ini terdapat pada panel belakang Osiloskop. Standar pada USB-nya adalah USB CDC_ACM dan standar untuk pemrograman nya menggunakan SCPI, 1994.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Frekuensi

Pengujian dilakukan dengan program Python di Raspberry Pi 4 Model B untuk mengatur modul AD9833 dan mengukur frekuensi. Program menggunakan *library* *gpiozero*, *Pyserial*, dan kelas AD9833 untuk menghasilkan sinyal. Raspberry Pi mengirim perintah pengukuran ke

osiloskop dengan "measure:source 1" dan mengambil data frekuensi 25 kali. Data string diubah menjadi tipe data float dan disimpan dalam array. Jika data adalah "?", maka dilewati. Setelah 25 pengambilan data, array tersebut dirata-ratakan untuk mendapatkan hasil frekuensi pengukuran.



GAMBAR 14

Data hasil pengambilan data sesuai dengan algoritma gambar 14 pengujian ditampilkan tabel dibawah ini,

Frekuensi Input (Hz)	Frekuensi Output (Hz)	Error (%)
50	48,5	3
55	56,769	3,216363636
100	97,853	2,147
150	147,654	1,564
200	191,746	4,127
250	245,742	1,7032
300	298,304	0,565333333
450	450,033	0,007333333
500	497,588	0,4824
550	549,504	0,090181818
Error Rata-rata (%)		1,690281212

TABEL 1

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa pengukuran frekuensi keluaran AD9833 dan yang terbaca pada osiloskop memiliki *error* rata-rata sebesar 1,690281212 %. Data dengan *error* tersebut, merupakan data yang didapatkan secara langsung dari pengukuran. Lalu, setelah dilakukan analisis regresi linier maka, *error* yang didapatkan adalah bernilai 1,718012442 %. Hasil regresi linear ini ditunjukkan pada gambar 15 dibawah,



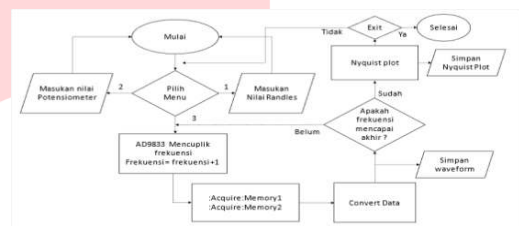
GAMBAR 15

Hubungan antara frekuensi terukur pada osiloskop (frekuensi output) dengan frekuensi yang dikirim masuk ke AD9833 (frekuensi input) memiliki keterkaitan satu sama lain yang sangat kuat. Dibuktikan dengan, nilai koefisien r-nya (relasi) adalah 0,999894 atau 99,99894 % dimana variabel frekuensi input dengan frekuensi output memiliki korelasi yang sangat kuat. Untuk koefisien determinansi-nya (r^2) bernilai 0,9997880112 atau 99,97880112 % atau dengan

kata lain variabel frekuensi input mampu menjelaskan frekuensi output sebesar 99,997880112%.

B. Pengujian Randles Circuit

Pengujian dilakukan dengan memasukan sinyal pertubasi dengan amplitudo sebesar 2,99 Volt dan ditimpangkan pada DC Bias sebesar 450 mV. Dengan R *Transimpedance* sebesar 20 kOhm. Sebelum masuk ke rangkaian potensiostat, sinyal pertubasi tersebut perlu dilemahkan pada saat memasuki rangkaian *Summing Amplifier* dengan memberikan resistor sebesar 470 kOhm. Sehingga amplitudo sinyal pertubasi yang akan masuk ke rangkaian *Differential Amplifier* menjadi lebih kecil daripada yang masuk. Lalu pada sisi *output* akan dilakukan akuisisi dengan Osiloskop dengan menggunakan program. Gambar 5 akan menjelaskan bagaimana program mengirim sinyal dari modul AD9833 DDS dan mengakuisisi data dengan osiloskop.



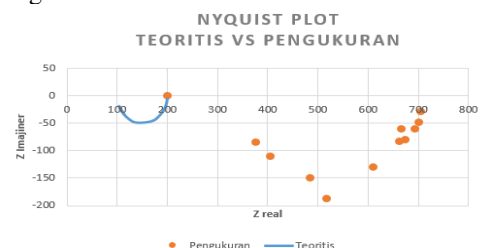
GAMBAR 16

Sehingga, didapatkan nilai dari pengukuran tersebut tertera pada Tabel 2 dibawah.

Frekuensi	Real		Imajiner	
	Teoritis	Pengukuran	Teoritis	Pengukuran
100	199,6071653	704,0089192	-6,255329979	-28,00557059
250	197,5943957	700,6121401	-15,32232013	-47,4986706
350	195,3914447	692,78252	-20,96703955	-58,96907033
400	194,0644009	672,9072086	-23,62897749	-78,54569096
450	192,6043602	664,13443	-26,16999219	-59,01954065
500	191,0252723	661,4514703	-28,58193549	-81,74404068
1000	171,7162561	609,2884847	-45,03780881	-129,4228662
2000	138,7967423	515,792369	-48,72870835	-186,746553
3000	121,98065	482,6071641	-41,41154459	-148,5589973
5000	109,2084423	403,4455281	-28,91450882	-109,9371235
8000	103,810892	374,3981173	-19,14592119	-83,9943199
4000	113,6796211	200,0003561	-34,36320817	0,002161861

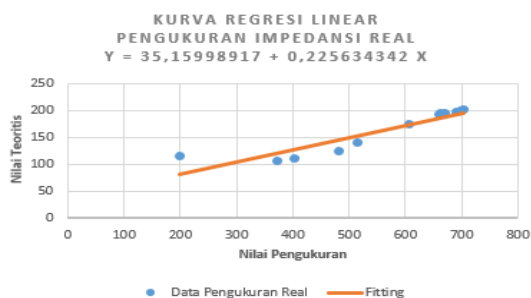
TABEL 2

Pengukuran dilakukan pada *Randles Circuit* dengan Rs sebesar 100 Ohm, Rct sebesar 100 Ohm dan Cdl sebesar 1 uF. Dari pengujian pada *Randles Circuit*, didapatkan Nyquist Plot hasil pengukuran yang masih belum pas dengan *fitting* nya dan terkesan jauh dari pada titik *fitting* nya, ditunjukkan pada gambar 6. Untuk data dilampirkan pada lampiran 2 Maka itu dilakukan *scaling* agar nilai nya bisa mendekati nilai asli nya dimana *scaling* menggunakan analisis regresi linear.



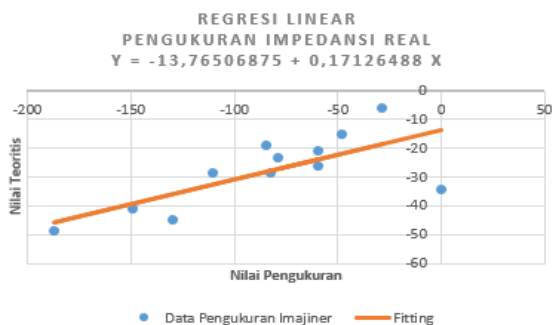
GAMBAR 17

Didapatkan, Koefisien relasi komponen real adalah 92,44% dengan determinansi sebesar 85,45%. Pada komponen imajiner, koefisien relasinya adalah 71,72% dengan determinansi 51,44%. Artinya, sebagian besar variasi dalam pengukuran imajiner dipengaruhi oleh variabel pengukuran, sedangkan sisanya oleh faktor luar. Kesalahan pengukuran awal adalah 243,98% untuk komponen real dan 227,60% untuk komponen imajiner. Setelah regresi linear, kesalahan berkurang menjadi 8,84% untuk komponen real dan 35,97% untuk komponen imajiner. Lihat Gambar 7 dan Gambar 8 untuk kurva regresi linear.



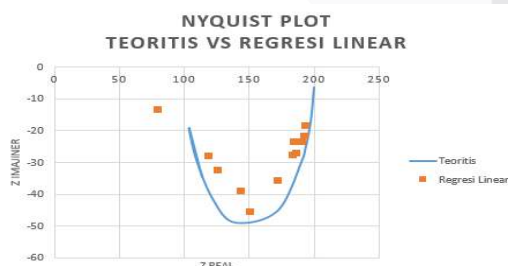
GAMBAR 18

Dan untuk yang komponen imajiner-nya bisa dilihat pada gambar dibawah,



GAMBAR 19

Sehingga Nyquist plot antara regresi linear dengan nilai teoritisnya menjadi seperti berikut,



GAMBAR 20

B. KESIMPULAN

Kesimpulan nya adalah, pengendalian modul AD9833 DDS melalui komunikasi serial SPI dari mikrokomputer untuk mengatur frekuensi output. Data dikirim ke IC AD9833 dengan mengisi register 16 bit.

Komunikasi dengan osiloskop Raspberry Pi 4 Model B dilakukan melalui kabel USB. Analisis data menunjukkan korelasi sangat kuat antara frekuensi input dan output (koefisien korelasi 99,99894%). Kesalahan awal 1,690281212% berkurang menjadi 1,718012442% setelah regresi linear. Dalam pengujian Randles Circuit, hubungan antara nilai teoritis dan pengukuran terbagi menjadi komponen real dan imajiner. Komponen real memiliki koefisien korelasi 92,43833129% dan kesalahan awal 243,9793474% berkurang menjadi 8,837180343% setelah regresi linear. Komponen imajiner memiliki koefisien korelasi sekitar 71,72450153%, dengan kesalahan awal 227,5960622% berkurang menjadi 35,96855878% setelah regresi linear. Meskipun plot Nyquist awalnya jauh dari nilai teoritis, regresi linear membantu mendekatkan titik-titik ke nilai teoritisnya.

REFERENSI

- Alavi, S. M. M., Mahdi, A., Payne, S. J., & Howey, D. A. (2017). Identifiability of Generalized Randles Circuit Models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(6), 2112–2120. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2635582>
- Analog Devices. (2019). *Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator AD9833*. 1–21. www.analog.com
- Arévalo-ramírez, T., Torres, C. C., Rosero, C., & Espinoza-montero, P. (2016). *for Its Design and Construction*.
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). Double-Layer Structure and Adsorption. In *Electrochemical Methods - Fundamentals and Applications*.
- Brigham, E. O., & Morrow, R. E. (1967). The fast Fourier transform. *IEEE Spectrum*, 4(12), 63–70. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.1967.5217220>
- Busono, P., Febryarto, R., & Mayantasasi, M. (2018). Rancang Bangun Potentiostat Ekonomis Berbasis Mikrokontroler untuk Aplikasi Sensor Elektrokimia. *Prosiding Semnastek*, 1–7.
- Chen, B., & Liang, Z. (2018). The design and implementation of high frequency signal generator based on DDS. *Proceedings - 8th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC 2018*, 1151–1155. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2018.00239>
- Cheng, Q., & Chen, Z. (2013). The Cause Analysis of the Incomplete Semi-Circle Observed in High Frequency Region of EIS Obtained from TEL-Covered Pure Copper. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(6), 8282–8290. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)12887-2](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)12887-2)
- Harrar, J. E. (2013). The potentiostat and the voltage clamp. *Electrochemical Society Interface*, 22(4), 42–44. <https://doi.org/10.1149/2.F01134if>
- Hendrawan, M., Fathona, I. W., & Saputra, C. (2023). Rancang Bangun Electrochemical Impedance Spectroscopy dengan Sumber Sinyal Segitiga. 1–7.
- Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). *Electrochemical Impedance Spectroscopy - A Tutorial*. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresci.2c00070>
- Macdonald, J. R., & Wiley, a J. (n.d.). *Theory , Experiment , and*.

- Mahdavian, M., & Attar, M. M. (2006). Another approach in analysis of paint coatings with EIS measurement: Phase angle at high frequencies. *Corrosion Science*, 48(12), 4152–4157. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.03.012>
- Mandaliya, H., Mankodi, P., & Makwana, B. (2013). *Microcontroller Based DDS Function Generator*. 2(1), 483–486.
- Popkirov, G. S., & Schindler, R. N. (1992). A new impedance spectrometer for the investigation of electrochemical systems. *Review of Scientific Instruments*, 63(11), 5366–5372. <https://doi.org/10.1063/1.1143404>
- Rahman, A. L., Fathonah, I. W., & Salam, R. A. (2021). *Rancang Bangun Potensiostat Dengan Frekuensi Kerja 1Hz - 40kHz untuk Keperluan Electrochemical Impedance Spectroscopy*. 8(5), 1–7.
- Randviir, E. P., & Banks, C. E. (2013). Electrochemical impedance spectroscopy: An overview of bioanalytical applications. *Analytical Methods*, 5(5), 1098–1115. <https://doi.org/10.1039/c3ay26476a>
- Sepúlveda, F., Hernández, J., & Manríquez, A. (2017). Construction of a Potentiostat to Perform Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Tests. *Modern Instrumentation*, 06(02), 15–27. <https://doi.org/10.4236/mi.2017.62002>
- Shakya, J. (1998). *Design and Fabrication of High*. 3(1), 373–376.
- Vyas, R. N., Li, K., & Wang, B. (2010). Modifying randles circuit for analysis of polyoxometalate layer-by-layer films. *Journal of Physical Chemistry B*, 114(48), 15818–15824. <https://doi.org/10.1021/jp105075t>