

Desain Voltage-Controlled Current Source untuk Sistem Electrical Impedance Tomography

Naldo A. S. Malelak¹, Ari Bangkit Sanjaya Umbu², Laura A. S. Lapono³, Ali Warsito⁴

Program Studi Fisika,
Fakultas Sains dan Teknik,
Universitas Nusa Cendana
¹alfamalelak1@gmail.com, ²aribangkitsanjaya@staf.undana.ac.id,
³laura_lapono@staf.undana.ac.id, ⁴ali.warsito@staf.undana.ac.id

Ringkasan

Electrical Impedance Tomography (EIT) adalah salah satu teknik pencitraan yang didasarkan pada pemetaan sebaran konduktivitas listrik. Salah satu blok sistem EIT yang memiliki peran penting adalah *Voltage-Controlled Current Source* (VCCS). VCCS berfungsi sebagai sumber arus AC konstan yang diinjeksikan pada objek pengukuran dengan standar nilai kuat arus maksimum yang diinjeksikan sebesar 5 mA pada rentang frekuensi 50-250 kHz. Pada penelitian ini dibatasi sistem VCCS dengan keluaran arus AC konstan 1 mA pada frekuensi tunggal 60 kHz. Sistem VCCS terdiri dari rangkaian *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) menggunakan IC ICL8038, rangkaian Butterworth *low-pass filter* (LPF) (topologi Sallen-Key) menggunakan IC LF412 dan rangkaian *Voltage-To-Current-Converter* (VCC) (rangkaian Enhance Howland Current Pump) menggunakan IC AD844. Hasil sistem VCCS dapat memberi keluaran arus AC konstan 0,96 mA untuk beban maksimal mencapai 3.730Ω . Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai sumber arus konstan untuk EIT dengan sistem frekuensi tunggal.

Kata kunci: Electrical Impedance Tomography, Voltage-Controlled Oscillator, Butterworth Low-pass filter, Voltage-to-current Converter

Abstract

Electrical Impedance Tomography (EIT) is one of the imaging techniques that is based on mapping the distribution of electrical conductivity. One of the EIT system blocks that has an important role is the Voltage-Controlled Current Source (VCCS). VCCS serves as a source of constant AC current injected at the measurement object with a standard maximum injected current strength value of 5 mA in the frequency range of 50-250 kHz. In this study, a VCCS system is limited to a constant AC current output of 1 mA at a single frequency of 60 kHz. The VCCS system consists of a Voltage-Controlled Oscillator (VCO) circuit using an ICL8038 IC, a Butterworth low-pass filter (LPF) circuit (Sallen-Key topology) using an LF412 IC and a Voltage-To-Current-Converter (VCC) circuit (Enhance Howland Current Pump circuit) using an AD844 IC. The result of the VCCS system can provide a constant AC current output of 0.96 mA for a maximum load of up to 3.730Ω . The results of this study can be used as a constant current source for EIT with a single frequency system.

Keywords: Electrical Impedance Tomography, Voltage-Controlled Oscillator, Butterworth Low-pass filter, Voltage-to-current converter

1. Pendahuluan

Electrical Impedance Tomography (EIT) adalah salah satu teknik pencitraan yang baru dikembangkan sekitar tahun 1980an. EIT didasarkan pada sebaran konduktivitas listrik yang diukur dari injeksi arus listrik rendah (mA) pada sepasang elektroda yang terpasang pada permukaan objek [1][2]. Pada bidang medis, EIT berguna dalam pencitraan medis dengan lebih aman dan lebih murah dibandingkan teknologi tomografi yang memanfaatkan emisi positron dan tentu tidak memiliki risiko paparan radiasi yang berbahaya [3][4][5].

EIT dapat diaplikasikan untuk monitoring paru-paru, monitoring fungsi hati, monitoring pendarahan internal, pencitraan kanker payudara, studi *premenstrual syndrome* dan sebagainya [6]. Namun, EIT memiliki kekurangan pada resolusi spasial yang dihasilkan memberikan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan teknik pencitraan seperti MRI atau CT, ditambah lagi, rekonstruksi citra EIT sangat sensitif terhadap gangguan *ill-posed* sehingga diperlukan perangkat keras yang memiliki akurasi tinggi [3].

Salah satu bagian utama EIT adalah VCCS (*Voltage-Controlled Current Source*), bagian ini berfungsi sebagai sumber arus AC konstan yang diperlukan sehingga dalam mencari nilai impedansi hanya dilakukan pengukuran tegangan pada objek. Untuk mendapatkan nilai pengukuran tegangan dengan akurasi tinggi diperlukan sumber arus AC konstan yang stabil, presisi, dan ber-*bandwidth* lebar [7]. Banyak penelitian sebelumnya yang telah dilakukan guna meningkatkan sistem VCCS yang merupakan rangkaian sumber arus konstan yang stabil, diantaranya seperti perancangan sistem VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*) sebagai pembangkit frekuensi [8] yang berhasil dilakukan namun terdapat DC *offset* sehingga diperlukan tambahan rangkaian filter [9] guna menghilangkan DC *offset*. Masalah lainnya juga terdapat pada keakuratan dari sumber arus AC konstan dari sistem VCC (*Voltage-to-Current-Converter*) pada frekuensi yang bervariasi dan beban resistivitas yang kompleks [10].

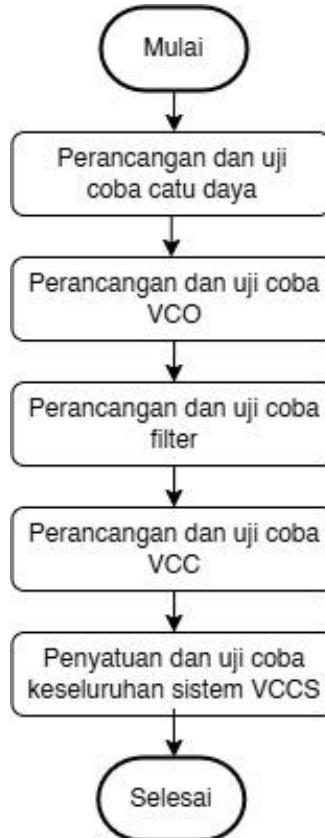
Salah satu parameter yang memengaruhi akurasi dan stabilitas VCCS pada aplikasi EIT adalah DC *offset* karena dapat menyebabkan terjadinya akumulasi muatan pada antarmuka elektroda dan objek (jaringan tubuh) yang menyebabkan terbentuknya lapisan ganda listrik (*Electric Double Layer* atau EDL) [11]. EDL menyebabkan efek polarisasi pada elektroda yang mendominasi pada pengukuran impedansi respons sampel sehingga impedansi yang terukur bukan merupakan impedansi jaringan secara akurat [12].

Penelitian ini dirancang untuk membuat sistem VCCS yang terdiri dari tiga komponen utama berupa rangkaian VCO, *low-pass filter* (LPF) dan VCC. Rangkaian VCO dirancang untuk menghasilkan gelombang sinusoidal menggunakan IC ICL8038 yang merupakan IC *dual supply* untuk meminimalisir DC *offset* karena menggunakan sumber tegangan positif dan negatif serta *ground* sebagai titik tengah antara kedua sumber tegangan, dengan frekuensi eksitasi VCO 60 kHz yang diperoleh dari variasi komponen resistor dan kapasitor. Rangkaian filter digunakan untuk melemahkan sinyal yang tidak diinginkan dan melewatkannya yang diinginkan [13]. Desain filter yang digunakan adalah *low-pass filter* orde dua topologi Sallen-Key yang dirancang menggunakan koefisien Butterworth guna memperoleh respons frekuensi yang cenderung datar dengan *cut-off* 100 kHz yang merupakan rentang frekuensi dari beberapa aplikasi EIT [2][14][15] dengan menggunakan IC LF412. Rangkaian VCC dirancang mengikuti model rangkaian Howland [16] dengan keluaran arus AC konstan 1 mA menggunakan IC AD844.

2. Metode Penelitian

Perancangan dan pengujian VCCS dibagi dalam penggerjaan empat komponen utama

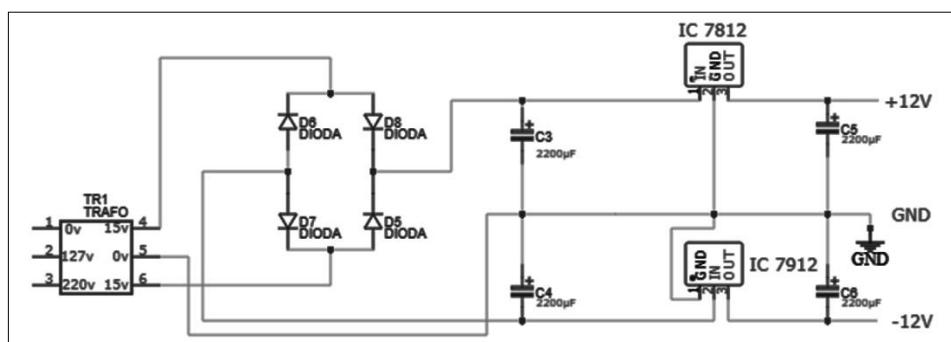
yakni catu daya, *voltage-controlled oscillator* (VCO), *low-pass filter* (LPF) dan *voltage-to-current-converter* (VCC). Diagram alir perancangan dan pengujian VCCS ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir perancangan dan pengujian VCCS

2.1. Perancangan dan pengujian catu daya

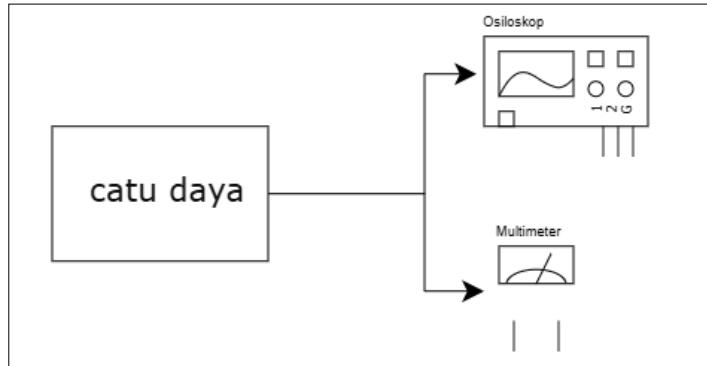
Catu daya dirancang untuk memiliki keluaran tegangan positif dan negatif (± 12 V) menggunakan komponen trafo CT 1 A, dioda dan kapasitor elko $2200 \mu\text{F}$. Tegangan keluaran digunakan sebagai catu daya untuk semua bagian sistem (VCO, filter dan VCC). Rangkaian catu daya adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Catu Daya

Pengujian catu daya berupa pengecekan keluaran tegangan DC dari trafo CT sebelum memasuki jembatan dioda, setelah melewati jembatan dioda dan setelah melewati IC 7812

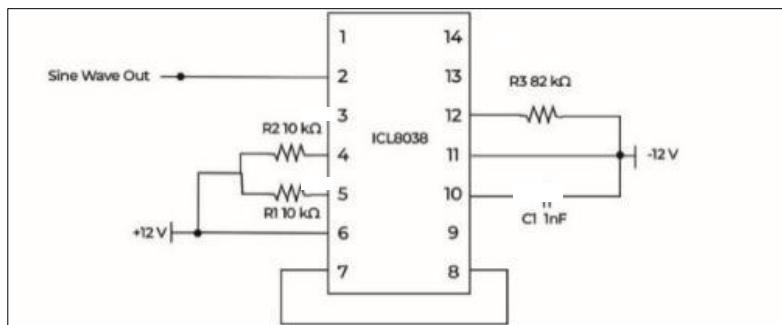
dan IC 7912 menggunakan multimeter dan osiloskop seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pengujian rangkaian catu daya

2.2. Perancangan dan pengujian voltage-controlled oscillator (VCO)

Perancangan VCO dirancang untuk sistem EIT dengan frekuensi eksitasi 60 kHz. VCO sebagai generator sinyal sinusoidal dirancang menggunakan IC ICL8038. IC ini menggunakan *dual supply*, yakni ± 12 V yang berbeda dibandingkan perancangan VCO yang menggunakan IC *single supply* [8] guna mencegah adanya DC offset. IC ini dapat menghasilkan sinyal akurasi tinggi dengan rentang frekuensi keluaran dari 0,001 Hz sampai lebih dari 300 kHz. Skematik perancangan VCO adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

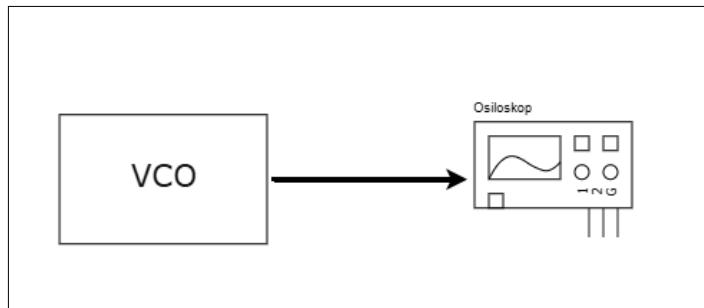


Gambar 4. Rangkaian voltage-controlled oscillator (VCO)

Pada Gambar 4 sinyal keluaran dari pin 2 adalah sinyal berbentuk sinusoidal. Dengan mengikuti Gambar 4, persamaan untuk keluaran frekuensi dapat ditentukan dengan Persamaan (1) dengan syarat $R_1 = R_2 = R$.

$$f_0 = \frac{0.33}{RC} \quad (1)$$

Pengujian dan analisis rangkaian VCO dilakukan menggunakan osiloskop dengan parameter yang ditinjau berupa frekuensi eksitasi, *duty cycle*, volt *peak-to-peak* (V_{pp}), DC *offset* dan bentuk sinyal keluaran VCO. Skema pengujian rangkaian VCO ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema pengujian rangkaian VCO

2.3. Perancangan dan pengujian low-pass filter (LPF)

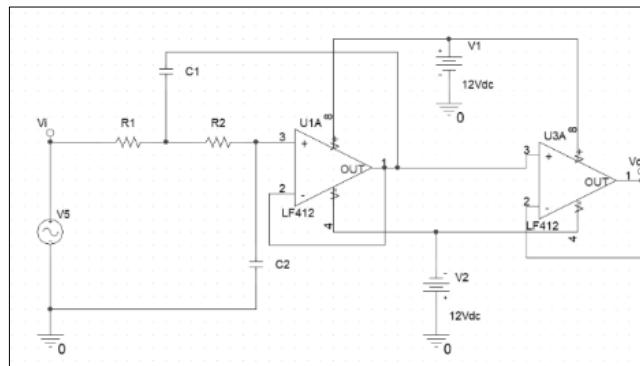
Perancangan Butterwoth LPF orde 2, topologi Sallen-Key dirancang menggunakan IC LF412 dengan frekuensi cutoff 100 kHz. Filter dirancang menggunakan koefisien Butterworth karena keluarannya yang memberikan respons yang cenderung datar dengan nilai tetapan $a_1 = 1,4142$ dan $b_1 = 1$.

Penentuan nilai resistor untuk R_1 dan R_2 dihitung dengan Persamaan (2), serta agar dapat mencapai nilai *real* untuk persamaan di dalam akar pada Persamaan (2), maka C_2 harus memenuhi kondisi pada Persamaan (3) dengan nilai C_1 yang telah ditetapkan [17].

$$R_{1,2} = \frac{a_1 C_2 \pm \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_c C_1 C_2} \quad (2)$$

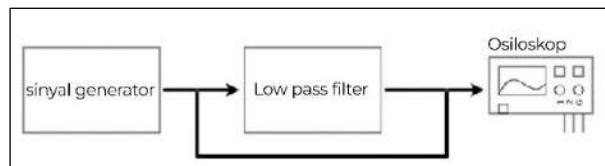
$$C_2 \geq C_1 \frac{4b_1}{a_1^2} \quad (3)$$

Hasil perhitungan nilai komponen RC kemudian disimulasikan untuk melihat respons filter sebelum dilakukan fabrikasi. Rangkaian LPF dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian low-pass filter

Pengujian respons filter menggunakan sinyal keluaran dari sinyal generator yang dapat dilakukan tuning dengan melakukan pengukuran sinyal sebelum dan setelah melewati filter menggunakan osiloskop. Skema pengujian rangkaian filter ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema pengujian rangkaian low-pass filter

Pengujian respons filter berupa perbandingan V_{pp} setelah melewati filter (V_{out}) dan sebelum memasuki filter (V_{in}). Data respons filter kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan Orcad PsPice 9.2.

2.4. Perancangan dan pengujian voltage-to-current converter (VCC)

Perancangan VCC menggunakan IC AD844 dengan skema rangkaian Enhance Howland Current Pump untuk mendapatkan sumber arus tetap. Sumber tegangan dari V_{in} adalah tegangan keluaran dari filter yang diteruskan ke VCC. Arus tetap yang disalurkan ke beban dapat ditentukan dengan Persamaan (4).

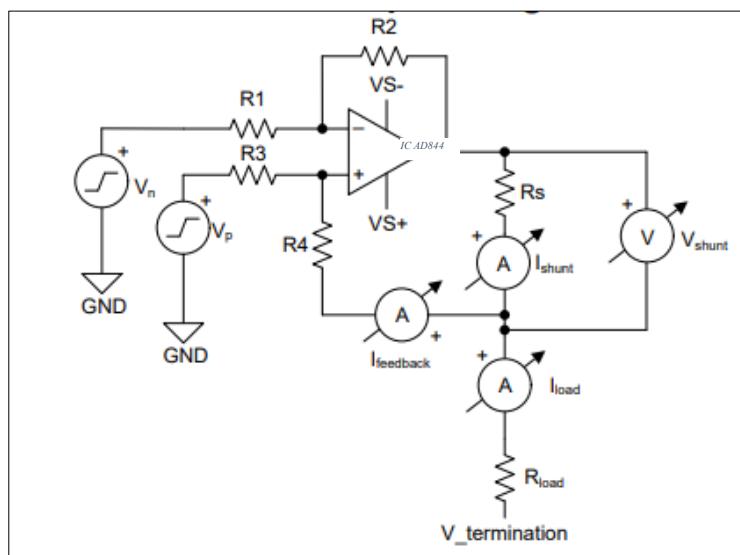
$$I_L = \frac{G(V_p - V_{in})}{R_s} \quad (4)$$

$$G = \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Dengan syarat:

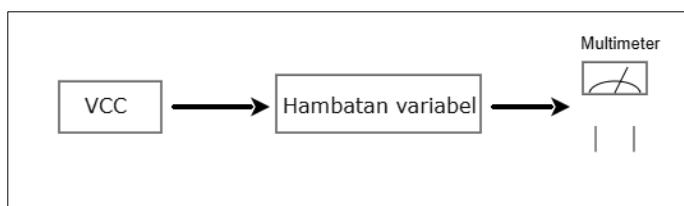
$$\frac{R_4 + R_s}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

Rangkaian Enhance Howland Current Pump [18] dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian Enhance Howland Current Pump

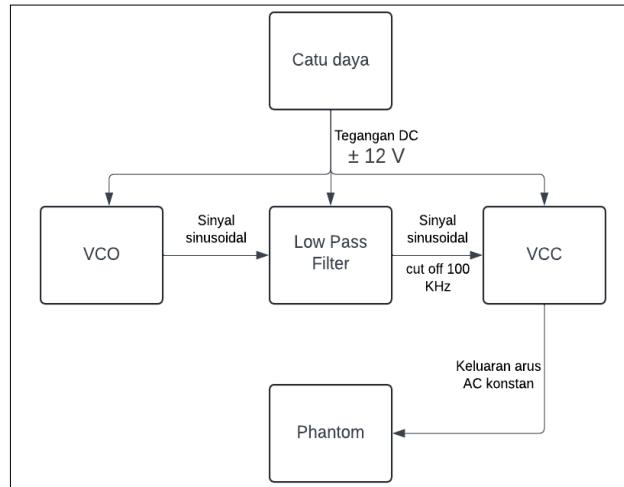
Pengujian VCC dilakukan menggunakan pengukuran keluaran VCC menggunakan multimeter. Parameter yang diukur adalah arus konstan yang dialirkan pada hambatan dengan nilai hambatan yang divariasikan untuk mendapatkan respons sejauh mana VCC dapat memberi nilai arus konstan seiring dengan nilai hambatan yang berubah-ubah. Skema pengujian VCC ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema pengujian VCC

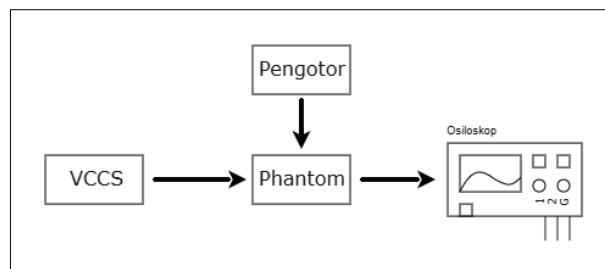
2.5. Perancangan dan pengujian keseluruhan sistem VCCS

Setelah semua bagian sistem (catu daya, VCO, filter dan VCC) telah difabrikasi, komponen-komponen tersebut kemudian dihubungkan menjadi suatu kesatuan sistem VCCS. Gambaran keseluruhan sistem VCCS ditunjukkan pada Gambar 10.



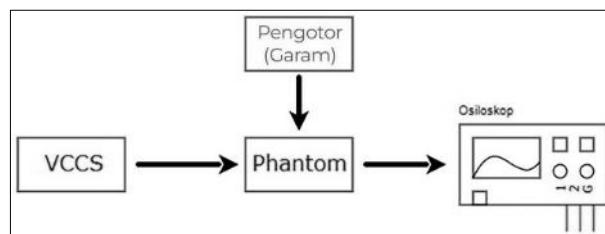
Gambar 10. Keseluruhan sistem VCCS

Pengujian sistem VCCS menggunakan dua jenis pengujian pada *phantom*. Pengujian pertama dilakukan dengan menginjeksikan arus konstan keluaran VCCS ke dalam *phantom* berupa wadah berisi air. Dari *phantom* kemudian dilihat respons perubahan frekuensi sebelum dan setelah diberi pengotor berupa bahan isolator dan konduktor. Skema satu pengujian VCCS ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Skema satu pengujian sistem VCCS

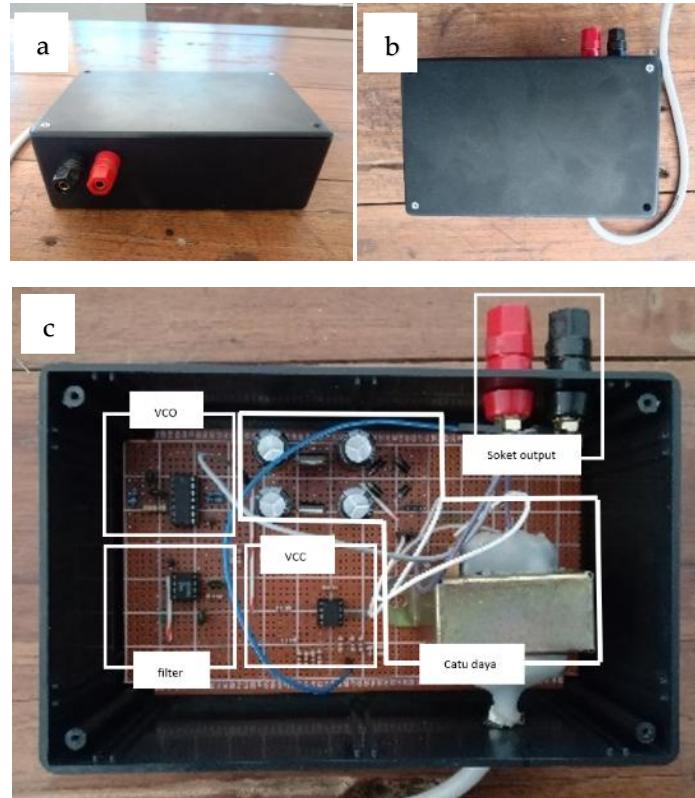
Pengujian kedua dilakukan dengan menginjeksikan arus konstan keluaran VCCS ke dalam *phantom* berupa wadah berisi air lalu dilihat respons perubahan frekuensi dari *phantom* saat diberi pengotor berupa garam yang dilarutkan kedalam air pada *phantom* dengan memvariasikan massa garam yang dilarutkan. Skema dua pengujian VCCS ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Skema dua pengujian sistem VCCS

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

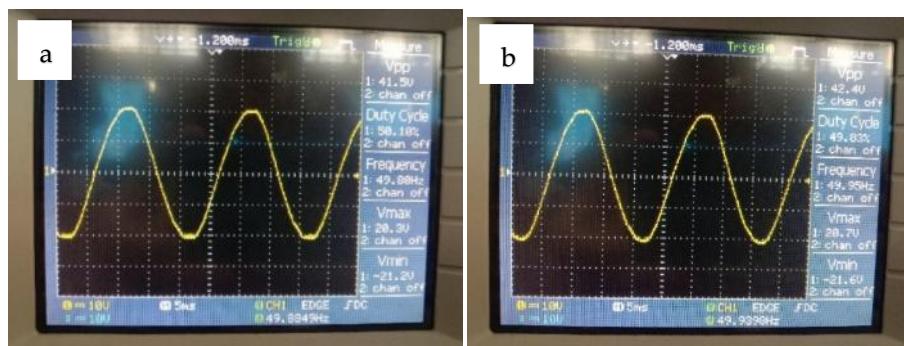
Tampilan desain VCCS ditunjukkan pada Gambar 13 memiliki empat sistem utama berupa catu daya, *voltage-controlled oscillator* (VCO), *low-pass filter* (LPF) dan *voltage-to-current converter* (VCC) serta keluaran arus konstan pada soket merah dan *ground* pada soket hitam.



Gambar 13. Tampilan VCCS (a) tampak depan VCCS, (b) tampak atas VCCS, (c) tampak bagian dalam VCCS

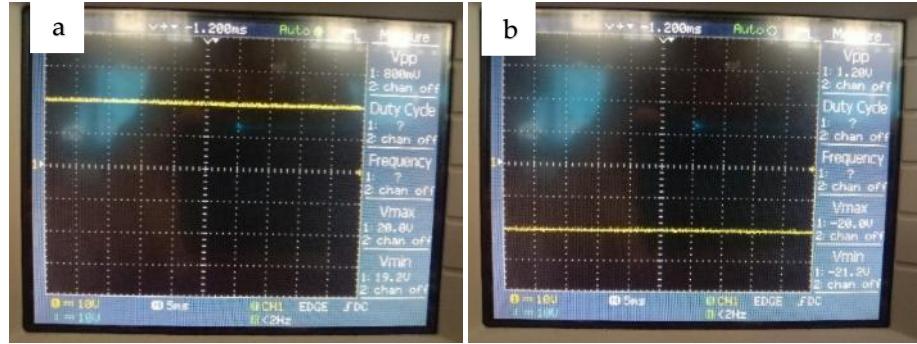
3.1. Perancangan dan pengujian catu daya

Catu daya merupakan komponen dasar yang menyuplai daya untuk semua bagian-bagian sistem (komponen aktif) agar dapat bekerja. Perancangan catu daya menggunakan trafo CT 1 A dengan nilai tegangan AC keluaran trafo CT yang digunakan adalah $41,5 \text{ V}_{\text{pp}}$ dan $42,4 \text{ V}_{\text{pp}}$ dengan *duty cycle* kedua keluaran yang stabil di sekitar 50% serta memiliki bentuk sinyal sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.



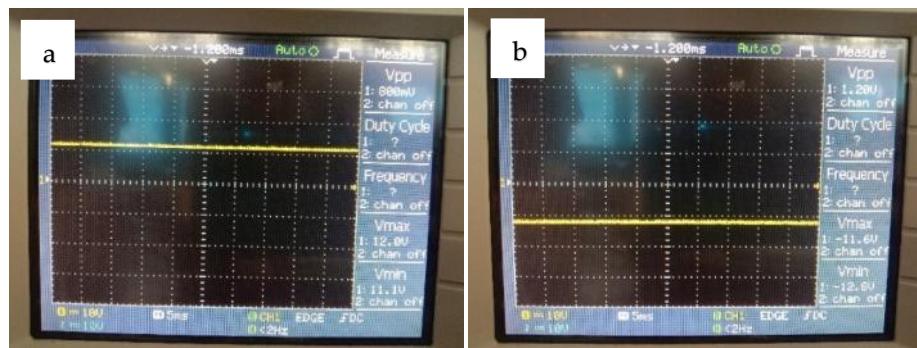
Gambar 14. Sinyal keluaran trafo CT (a) channel 1, (b) channel 2

Tegangan AC dari trafo CT diubah menjadi tegangan DC menggunakan jembatan dioda sebagai penyearah gelombang sehingga tegangan DC keluaran dari jembatan dioda yang diamati menggunakan osiloskop menunjukkan nilai V_{max} 20,0 V untuk keluaran positif dan V_{min} -21,2 V untuk keluaran negatif serta respons bentuk sinyal yang menunjukkan garis datar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Sinyal keluaran jembatan dioda (a) keluaran positif, (b) keluaran negatif

Keluaran positif dan negatif dari jembatan dioda dihubungkan ke IC 7812 dan IC 7912 sebagai regulator tegangan $\pm 12V$. Respons keluaran sinyal setelah melewati IC ditunjukkan pada Gambar 16.

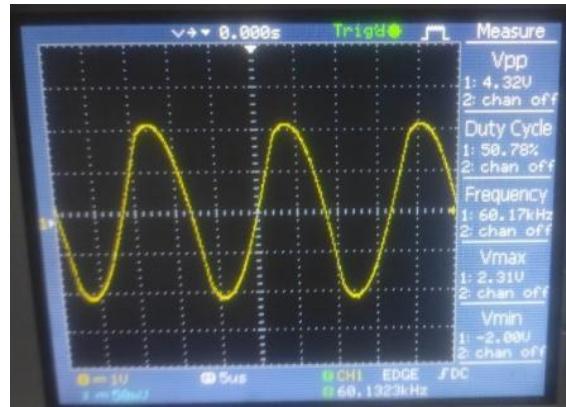


Gambar 16. Sinyal keluaran catu daya (a) keluaran positif, (b) keluaran negatif

Sesuai dengan Gambar 16, keluaran hasil perancangan catu daya yang ditampilkan pada osiloskop juga diukur menggunakan multimeter dan menunjukkan keluaran tegangan DC sebesar +12,08 V dan -11,68 V yang kemudian digunakan sebagai catu daya untuk semua blok sistem.

3.2. Perancangan dan pengujian voltage-controlled oscillator (VCO)

Sistem VCO berfungsi sebagai *function generator* yang membangkitkan sinyal sinusoidal dengan nilai frekuensi yang dikendalikan oleh masukan tegangan. VCO dirancang untuk memperoleh frekuensi eksitasi 60 kHz, dilakukan dengan memvariasikan nilai komponen eksternal. Pemilihan frekuensi eksitasi tunggal 60 kHz karena dianggap sebagai frekuensi yang mendekati frekuensi optimum dan sering digunakan dalam berbagai monitoring proses dan jaringan biologis seperti aktivitas otak dan sistem pernapasan, yakni 50 kHz [19]. Komponen eksternal sesuai rancangan pada Gambar 4 adalah $R_1=10\text{ k}\Omega$, $R_2=10\text{ k}\Omega$ dan $C_1=0,54\text{ nF}$. Hasil pengujian sinyal keluaran VCO ditunjukkan pada Gambar 17.



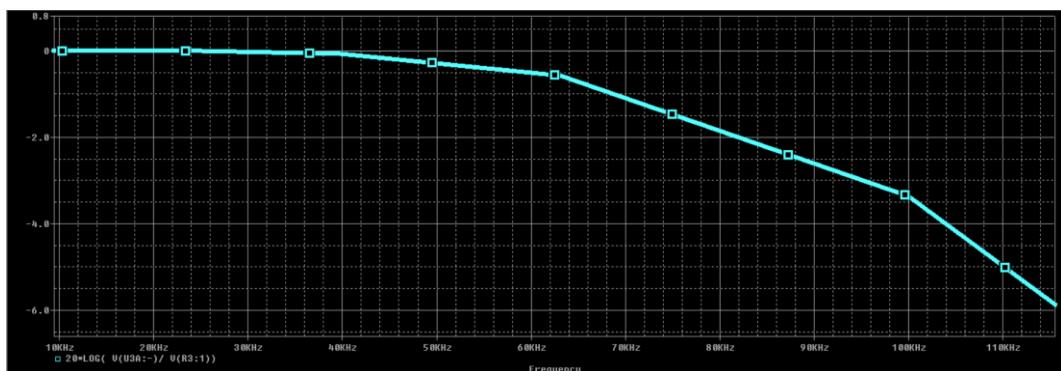
Gambar 17. Keluaran sinyal VCO

Sinyal keluaran VCO pada Gambar 17 menunjukkan nilai frekuensi yang berada pada 60,17 kHz dengan *duty cycle* 50,78% yang artinya keluaran sinyal VCO simetris antara tegangan maksimum (V_{max}) dan tegangan minimum (V_{min}). Pada IC ICL8038, pengatur simetris bentuk sinyal adalah komponen resistor yang terhubung pada pin 4 dan 5, dibutuhkan nilai resistor yang sama agar sinyal keluaran simetris. Pada fabrikasi VCO digunakan komponen resistor tetap bernilai 10 k Ω namun keduanya tidak bernilai tepat 10 k Ω sehingga berpengaruh pada bentuk sinyal keluaran.

Tegangan *peak-to-peak* (V_{pp}) keluaran VCO bernilai 4,32 V $_{\text{pp}}$ dengan nilai $V_{\text{max}} +2,31$ V dan $V_{\text{min}} -2,00$ V. Jarak V_{max} dan V_{min} tidak sama dari titik nol (0 V) sehingga terdapat DC *offset* sebesar 0,155 V. Penyebab terjadinya DC *offset* adalah sumber tegangan DC yang juga tidak tepat sama antara tegangan positif dan negatif.

3.3. Perancangan dan pengujian low-pass filter (LPF)

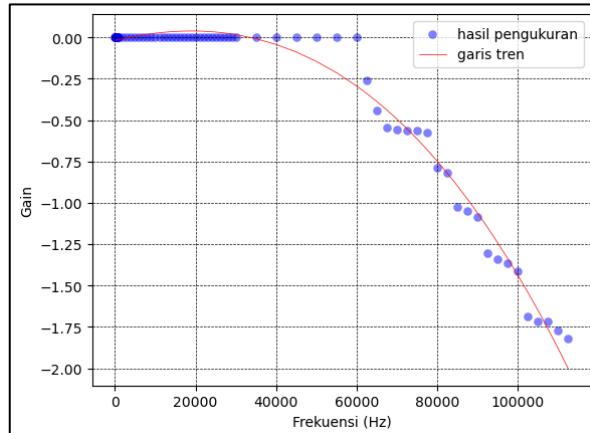
Perancangan *low-pass filter* dimulai dengan simulasi respons filter menggunakan Orcad PsPice 9.2 sebelum dilakukan fabrikasi. Perancangan LPF menggunakan koefisien Butterworth sehingga mendapatkan respons gain yang miring dengan cepat tanpa adanya gangguan atau osilasi serta menggunakan topologi Sallen-Key karena lebih unggul untuk penggunaan faktor Q yang rendah, stabil pada frekuensi tinggi serta fabrikasi yang sederhana dan mudah. Nilai komponen RC yang disimulasikan sebelumnya dilakukan pendekatan menggunakan perhitungan menggunakan Persamaan (2). Sesuai dengan rangkaian *low-pass filter* pada Gambar 6 dan pendekatan nilai komponen RC maka digunakan komponen eksternal berupa $R_1 = 500 \Omega$, $R_2 = 1000 \Omega$, $C_1 = 2,7 \text{ nF}$ dan $C_2 = 1,2 \text{ nF}$. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Respons simulasi LPF menggunakan Orcad PsPice 9.2

Hasil simulasi menunjukkan respons datar dan perubahan pada *gain* yang mulai menurun dari frekuensi sekitar 40 kHz dengan gain kurang dari -0,5 dB.

Fabrikasi filter dibuat sesuai dengan rangkaian yang disimulasikan, respons uji coba filter ditunjukkan pada Gambar 19.

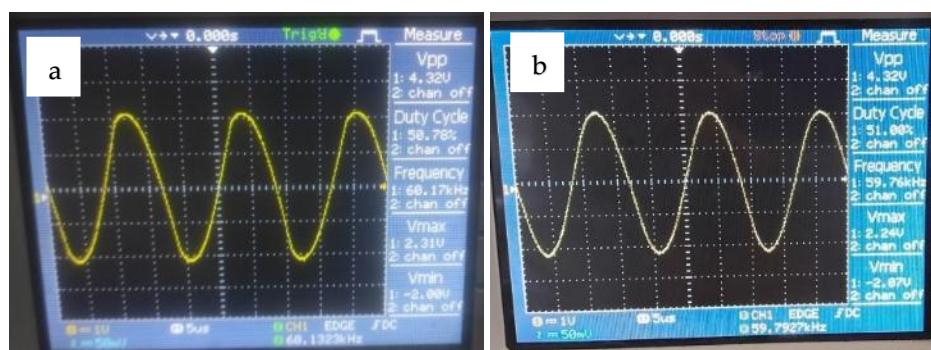


Gambar 19. Respons uji coba LPF

Hasil dari filter yang dibuat berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada Orcad PsPice 9.2 diuji coba menggunakan sinyal yang bersumber dari sinyal generator, data yang diperoleh berupa masukan dan keluaran sinyal (V_{pp}) digunakan untuk merepresentasikan *gain*. Hasil uji coba terbatas pada 10 Hz - 112,5 kHz karena keterbatasan pada keluaran sinyal generator.

Hasil uji coba yang ditunjukkan pada Gambar 19 memiliki respons yang mirip dengan simulasi, yakni memberi respons yang cenderung datar sebelum frekuensi *cutoff* dan mulai menurun pada 62 kHz. Terdapat perbedaan kecil antara simulasi dan uji coba yang dapat terjadi karena nilai komponen yang tidak tepat sama pada fabrikasi.

Hasil pengujian keluaran sinyal VCO sebelum dan setelah melewati filter ditunjukkan pada Gambar 20.

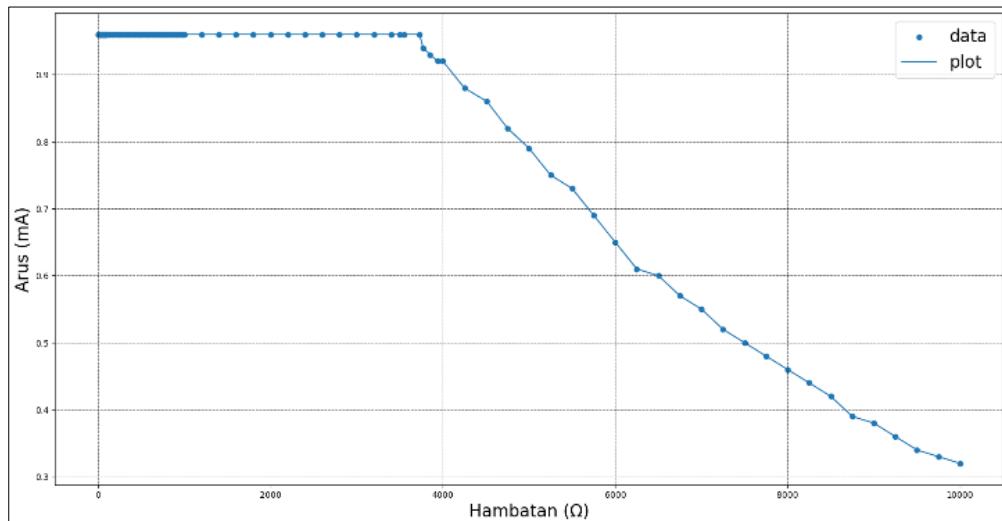


Gambar 20. Respons sinyal VCO (a) sebelum melewati filter, (b) setelah melewati filter

Uji coba sinyal keluaran VCO setelah melewati filter menunjukkan keluaran V_{pp} tidak mengalami penurunan yang artinya filter ini masih melewatkannya sinyal keluaran VCO. Terdapat perubahan nilai pada V_{max} dari 2,31 V menjadi 2,24 V dan pada V_{min} dari -2,00 menjadi -2,07 V sehingga nilai DC offset juga berubah menjadi lebih kecil makin mendekati 0 V yakni dari 0,155 V menjadi 0,085 V.

3.4. Perancangan dan pengujian voltage-to-current-converter (VCC)

Hasil perancangan VCC memiliki keluaran arus AC sebesar 0,96 mA. Perancangan VCC dilakukan sesuai dengan rangkaian pada Gambar 8 dengan komponen $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ dan $R_s = 4 \text{ k}\Omega$. Uji coba VCC dilakukan dengan mengukur besar arus AC keluaran VCC menggunakan multimeter saat arus AC dialirkan melewati hambatan yang divariasikan dari 1Ω sampai $10 \text{ k}\Omega$. Plot respons arus AC keluaran VCC terhadap perubahan hambatan ditunjukkan pada Gambar 21.

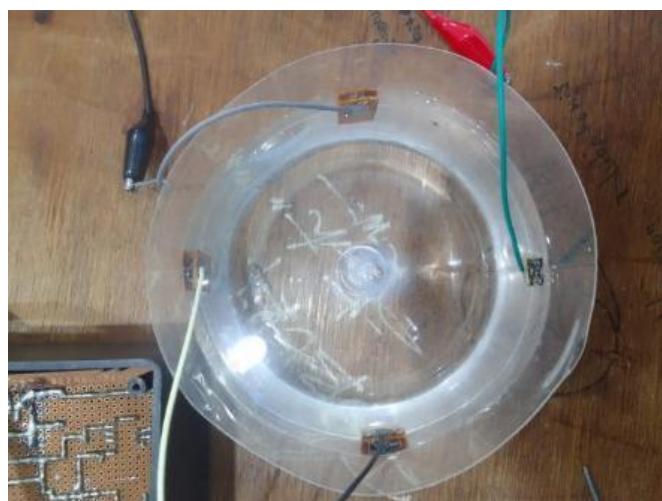


Gambar 21. Respons uji coba arus konstan keluaran VCC terhadap perubahan hambatan

Rangkaian VCC memiliki keluaran arus AC sebesar 0,96 mA dan mampu mempertahankan nilai arus AC sampai hambatan 3.730Ω lalu mulai mengalami penurunan arus seiring meningkatnya beban.

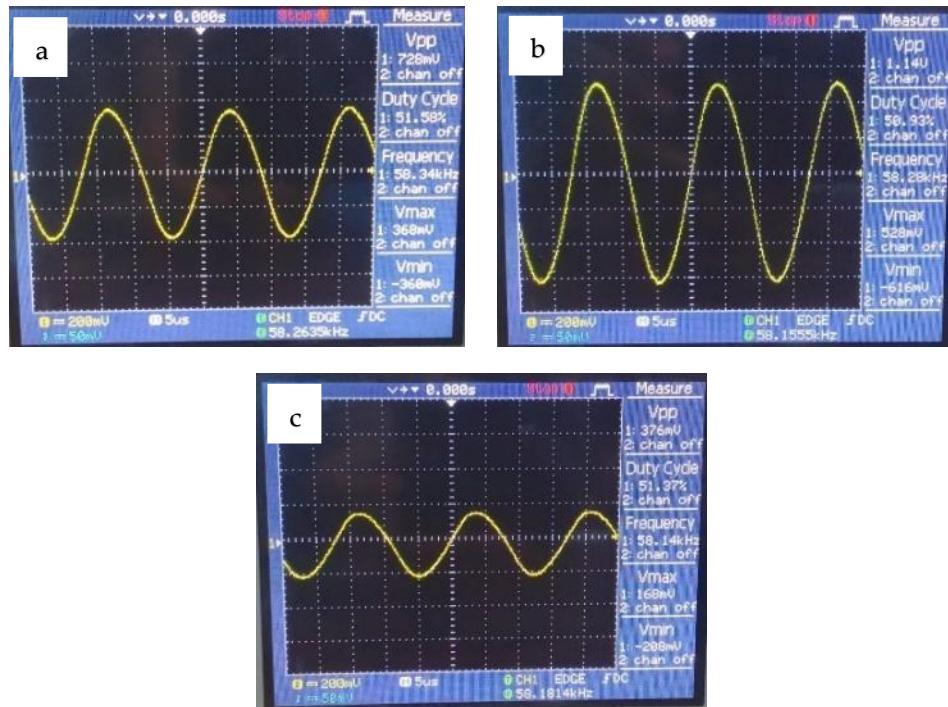
3.5. Uji coba keseluruhan sistem voltage-controlled current source (VCCS)

Pengujian sistem VCCS menggunakan keluaran berupa arus AC konstan yang diinjeksikan menggunakan dua elektroda tembaga (elektroda keluaran arus AC dan *ground*) ke cairan dalam wadah (*phantom*). Sinyal pada *phantom* diukur menggunakan dua elektroda yang terhubung ke osiloskop seperti yang ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. Pengujian injeksi keluaran VCCS pada phantom

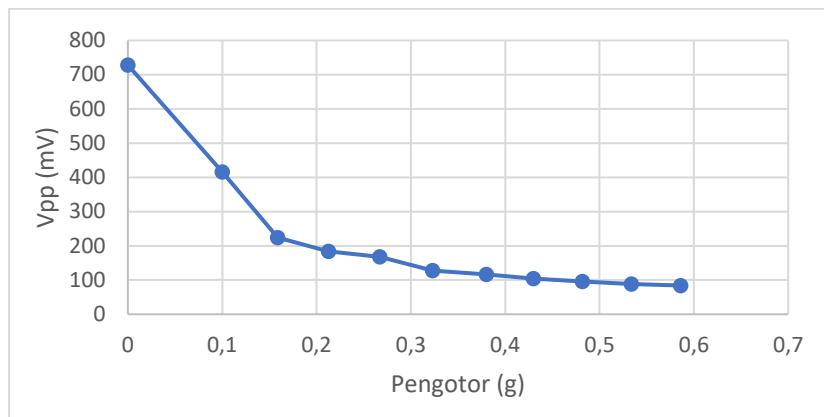
Pengujian VCCS skema satu dengan melihat respons sinyal dari *phantom* dilakukan untuk melihat respons sinyal VCCS sebelum diberi pengotor dan saat diberi pengotor berupa bahan isolator dan bahan konduktor ditunjukkan pada Gambar 23.



Gambar 23. Pengujian sinyal injeksi pada phantom (a) tanpa pengotor, (b) diberi pengotor bahan konduktor, (c) diberi pengotor bahan isolator

Uji coba VCCS menunjukkan respons perubahan V_{pp} dan bentuk sinyal saat diberikan pengotor. Hasil uji coba menunjukkan adanya perubahan amplitudo gelombang dengan nilai V_{pp} yang berubah-ubah saat diberikan pengotor yakni V_{pp} yang dengan kondisi awal tanpa pengotor bernilai 728 mV meningkat saat *phantom* diberi pengotor bahan isolator menjadi 1,14 V dan menurun saat diberi pengotor bahan konduktor menjadi 376 mV. Kenaikan V_{pp} saat diberi pengotor bahan isolator terjadi karena adanya perubahan sebaran muatan dan kerapatan arus di sekitar pengotor yang mana arus sukar untuk melewati bahan isolator sehingga terjadi kenaikan V_{pp} sedangkan saat diberi pengotor bahan konduktor maka sebaran muatan dan arus juga akan cenderung melalui pengotor sehingga terjadi penurunan V_{pp} di sekitar pengotor berbahan konduktor.

Pengujian VCCS skema dua dilakukan dengan memberi pengotor berupa garam pada *phantom*. Respons pengujian VCCS skema dua ditunjukkan pada Gambar 24. Pengujian dengan memvariasikan jumlah pengotor berupa garam menunjukkan respons V_{pp} yang terus menurun seiring dengan bertambahnya jumlah pengotor. Respons ini terjadi karena garam yang dilarutkan membuat *phantom* makin bersifat elektrolit dan mampu melewatkannya arus listrik dengan lebih baik yang artinya hambatan pada *phantom* semakin kecil dan tegangan pun akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya pengotor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24. Grafik respons sinyal terhadap pengotor garam

4. Kesimpulan

Desain sistem VCCS untuk sistem EIT frekuensi tunggal berhasil dibuat dengan frekuensi eksitasi tunggal 60 kHz. Hasil perancangan memiliki DC *offset* keluaran VCO sebesar 0,155 V yang diperkecil menjadi 0,085 V setelah melewati rangkaian LPF. Rangkaian VCCS memiliki keluaran arus AC konstan 0,96 mA yang mampu bertahan sampai beban maksimal 3.730 Ω dan memberi respons perubahan sinyal yang jelas teramat pada pengujian menggunakan pengotor berupa bahan isolator, konduktor dan variasi larutan garam pada *phantom*.

Daftar Pustaka

- [1] A. Adler and D. Holder, *Electrical Impedance Tomography Methods, History and Applications*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [2] S. Mansouri, Y. Alharbi, F. Haddad, S. Chaboub, A. Alshrouf, and A. A. Abd-Elghany, "Electrical Impedance Tomography - Recent Applications and Developments," *Journal of electrical bioimpedance*, vol. 12, no. 1, pp. 50–62, 2021, doi: 10.2478/joeb-2021-0007.
- [3] B. Brazez, Y. Haddab, N. Zemiti, F. Mailly, and P. Nouet, "An open-source and easily replicable hardware for Electrical Impedance Tomography," *HardwareX*, vol. 11, pp. e00278, 2022.
- [4] C. Sebu, "Electrical Impedance Mammography: the key to low-cost, portable and non-invasive breast cancer screening?" *Xjenza Online*, vol. 5, no. 2, pp. 154-157, 2017, doi: 10.7423/XJENZA.2017.2.09.
- [5] G. Singh, S. Anand, B. Lall, A. Srivastava and V. Singh, "Development of a microcontroller based electrical impedance tomography system," *2015 Long Island Systems, Applications and Technology*, Farmingdale, NY, USA, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/LISAT.2015.7160174.
- [6] V. Chitturi and N. Farrukh, "An alternate voltage-controlled current source for electrical impedance tomography applications," in *Proceedings of DAL: Data Analytics and Learning*, Singapore, Nov. 5, 2018, pp. 93–102, doi: 10.1007/978-981-13-2514-4_8.
- [7] A. J. Puspitasari and E. Endarko, "Band-Pass Filter Circuit Design For Multi-Frequency Electrical Impedance Tomography System," *Jurnal Forum Nuklir*, vol. 13, no. 3, pp. 13–18, 2020., doi: 10.17146/jfn.2019.13.3.5631.

- [8] A. B. S. Umbu, "Rancang Bangun Voltage-Controlled Oscillator (VCO) Untuk Sistem Electrical Impedance Tomography (EIT) Frekuensi Tunggal 20 KHz," *Technologia*, vol. 13, no. 4, pp. 326–330, 2022, doi: 10.31602/tji.v13i4.7990.
- [9] A. B. S. Umbu, "Desain Band Pass Filter Dengan Frekuensi Cut-Off 1 KHz dan 100 KHz Untuk Sistem Electrical Impedance Tomography (EIT)," *ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 9, no. 1, pp. 58–63, 2023, doi: 10.31764/orbita.v9i1.13947.
- [10] A. M. Ahmed and V. Chitturi, "Multi-Frequency Current Source for Varying Loads in Electrical Impedance Tomography Systems," in *Advance in Automation, Signal Processing, Instrumentation and Control*, Singapore: Springer, 2021, pp. 2155–2166.
- [11] A. H. B. Daurado, "Electric Double Layer: The Good, the Bad, and the Beauty," *Electrochem*, vol. 3, no. 4, pp. 789–808, 2022, doi: 10.3390/electrochem3040052
- [12] D. Padmaraj, J. H. Miller, J. Wosik, and W. Zagozdzon-Wosik, "Reduction of electrode polarization capacitance in low-frequency impedance spectroscopy by using mesh electrodes," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 29, no. 1, pp. 13–17, 2011, doi: 10.1016/j.bios.2011.06.050
- [13] O. B. Olalekan, and O. V. Toluwan, "Sallen-Key Topology, MFB and Butterworth in Bandpass Design for Audio Circuit Design," *Asian Journal of Electrical Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 23–28, 2017, doi: 10.51983/ajes-2017.6.1.1992.
- [14] V. Chitturi and N. Farrukh, "Development Of An Agilent Voltage Source For Electrical Impedance Tomography Applications," *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 1819–6608, 2016.
- [15] R. Basak, and K. A. Wahid, "A Rapid, Low-Cost, and High-Precision Multifrequency Electrical Impedance Tomography Data Acquisition System for Plant Phenotyping," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 13, p. 3214, 2022, doi: 10.3390/rs14133214.
- [16] I. C. Setiadi, "Desain Sumber Arus untuk Electrical Impedance Tomography (EIT)," *e-Jurnal Arus Elektro Indonesia*, vol. 1, no. 3, pp. 27–33, 2015.
- [17] R. Mancini, *Op Amps for Everyone*, 1st ed. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2002.
- [18] S. Franco, *Design With Operational Amplifiers And Analog Integrated Circuits*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [19] F. A. E. Revelo, V. H. M. Leyton, and C. F. R. Rodas, "Electrical impedance tomography: hardware fundamentals and medical applications," *Ingeniería Solidaria*, vol. 16, no. 3, 2020, doi: 10.16925/2357-6014.2020.03.02.

This Page Intentionally Left Blank