

RANCANG BANGUN VOLTAGE-CONTROLLED OSCILLATOR (VCO) MULTIFREKUENSI UNTUK SISTEM ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY (EIT)

Ari Bangkit Sanjaya Umbu, Hadi Imam Sutaji, Christine Mbiliyora dan Jonshon Tarigan
Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto-Penfui, Kota
Kupang, Nusa Tenggara Timur, Kode Pos 85148, Indonesia
E-mail: aribangkit.sanjaya@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini berhasil merancang Voltage-Controlled Oscillator (VCO) multifrekuensi untuk sistem Electrical Impedance Tomography (EIT). VCO yang dibangun menggunakan modul AD9833 sebagai pembangkit sinyalnya dan Arduino nano sebagai unit kontrolnya. Hasil perancangan menunjukkan bahwa VCO multifrekuensi mampu membangkitkan sinyal dengan rentang frekuensi bervariasi antara 10 kHz hingga 1 MHz. Pengujian menunjukkan bahwa sinyal keluaran VCO memiliki bentuk sinusoidal yang konsisten, serta kestabilan duty cycle yang baik di seluruh rentang frekuensi yang diuji. Kalibrasi VCO terhadap signal generator standar pada rentang frekuensi uji 10 kHz hingga 100 kHz menunjukkan akurasi frekuensi VCO yang tinggi. Hal ini ditunjukkan dengan rata-rata error frekuensi pada rentang pengujian tersebut adalah 0,22%, serta konsistensi duty cycle dengan rata-rata sebesar 50,32%. Secara keseluruhan, VCO yang dirancang menunjukkan performa yang sangat baik dalam menghasilkan sinyal dengan rentang frekuensi 10 kHz hingga 1 MHz dan kestabilan sinyal yang tinggi. Oleh karena itu, VCO yang telah dibangun dapat digunakan sebagai sumber sinyal eksitasi yang andal untuk aplikasi Electrical Impedance Tomography (EIT) multifrekuensi.

Kata kunci: Electrical Impedance Tomography (EIT); Multifrekuensi; Voltage-Controlled Oscillator (VCO); Tomografi

Abstract

This study successfully designed a multifrequency Voltage-Controlled Oscillator (VCO) for the Electrical Impedance Tomography (EIT) system. The developed VCO utilizes the AD9833 module as the signal generator and Arduino Nano as the control unit. The design results show that the multifrequency VCO can generate signals with a frequency range from 10 kHz to 1 MHz. Testing demonstrates that the VCO output signal exhibits a consistent sinusoidal waveform and stable duty cycle across the tested frequency range. Calibration of the VCO against a standard signal generator within the frequency range of 10 kHz to 100 kHz shows high-frequency accuracy, with an average frequency error of 0.22% and an average duty cycle consistency of 50.32%. Overall, the designed VCO performs excellently in generating signals with a frequency range of 10 kHz to 1 MHz and maintaining high signal stability. Therefore, the developed VCO can be used as a reliable excitation signal source for multifrequency Electrical Impedance Tomography (EIT) applications.

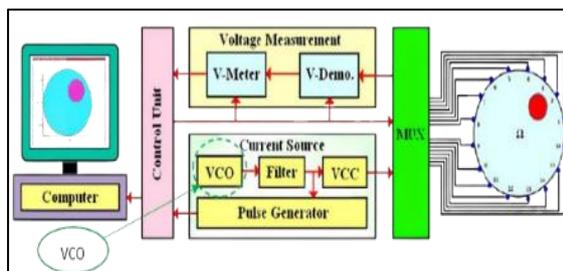
Keywords: Electrical Impedance Tomography (EIT); multifrequency; Voltage-Controlled Oscillator (VCO); Tomography

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat dan meluas telah mendorong manusia untuk terus berinovasi dalam berbagai bidang, termasuk dalam pengembangan sistem pencitraan medis seperti *Electrical Impedance Tomography* (EIT) [1]. EIT adalah salah satu metode pencitraan non-invasif yang digunakan untuk merekonstruksi distribusi konduktivitas dalam suatu objek [2,3,4].

Kualitas rekonstruksi citra yang dihasilkan oleh sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu keandalan perangkat keras dan perangkat lunaknya [5,6,7]. Di sisi perangkat keras, salah satu rangkaian yang memiliki peran penting yang mempengaruhi hasil rekonstruksi citra adalah *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO). Rangkaian VCO pada sistem EIT terletak pada blok *Voltage Controlled Current Source* (VCCS) [8].

Pada blok VCCS ini umumnya tersusun atas tiga bagian utama yaitu, *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) yang berfungsi sebagai pembangkit sinyal eksitasi [9], Filter yang berperan sebagai penghalang sinyal di luar rentang yang ditetapkan [10,11] dan *Voltage-to Current Converter* yang berfungsi sebagai pengubah tegangan menjadi arus [2,12]. Konfigurasi sistem EIT yang menampilkan letak rangkaian VCO ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi Sistem EIT Secara Umum [8]

Pada umumnya sistem EIT dirancang dengan menggunakan komponen yang dapat membangkitkan sinyal sinusoidal sebagai sumber eksitasi [1,13]. Frekuensi eksitasi yang diperbolehkan untuk aplikasi medis berkisar pada 10 KHz hingga 10 MHz [8,14,15]. Sinyal eksitasi dengan frekuensi tersebut dapat dihasilkan dengan merancang sebuah VCO dengan memanfaatkan berbagai jenis komponen maupun modul yang tersedia di pasaran, seperti XR2206, MAX038, ICL8038, LM741, maupun modul AD 9833. Perbandingan kemampuan komponen pembangkit sinyal bolak-balik ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan kemampuan komponen pembangkit sinyal bolak-balik

Komponen	Vpp	Frekuensi	
		Maksimum	Ref.
		(Hz)	
MAX038	2	20M	[16]
XR2206	*	1M	[17]
LM741	17.2	18K	[18]
ICL8038	3	300K	[19]
AD9833	0.65	12.5M	[20]

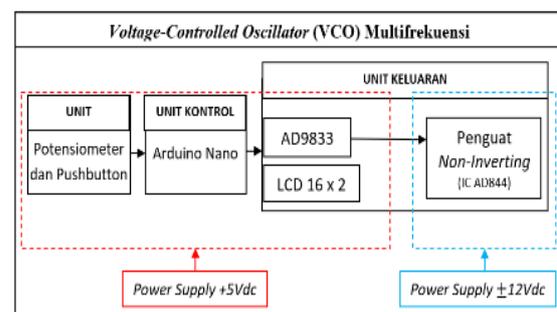
* tidak diketahui

Sebagian besar *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) yang digunakan dalam sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT)

hingga saat ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan satu frekuensi atau beberapa frekuensi dalam rentang yang sempit. Penggunaan eksitasi sinyal yang tunggal dan terbatas dalam sistem EIT menyebabkan terbatasnya kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan konduktivitas yang kompleks di dalam suatu objek. Keterbatasan VCO tersebutlah yang menginspirasi peneliti untuk melakukan penelitian terkait Rancang Bangun *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi untuk Sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT). Diharapkan penggunaan VCO dengan berbagai frekuensi dapat meningkatkan kualitas yang dihasilkan oleh sistem EIT dalam rekonstruksi citra.

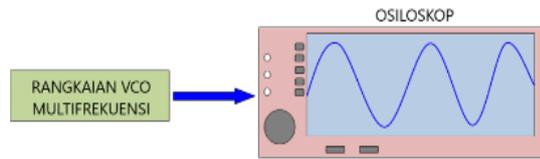
METODE

Voltage-Controlled Oscillator (VCO) multifrekuensi dibangun menggunakan enam komponen utama yaitu Arduino Nano, modul IC *function generator* AD9833, IC Op-Amp AD844, LCD 16x2, Potensiometer dan Pushbutton. Modul AD9833 dipilih karena mampu menghasilkan frekuensi hingga 12.5 MHz. Gambaran konfigurasi sistem VCO multifrekuensi untuk sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) ditunjukkan pada Gambar 2.



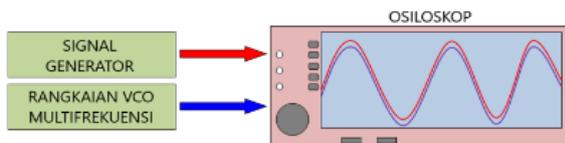
Gambar 2. Konfigurasi Sistem *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi

Pengujian VCO yang telah dirancang dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Pengujian ini bertujuan agar diperoleh informasi terkait bentuk sinyal keluaran, amplitudo (*tegangan peak-to-peak*) dan rentang frekuensi yang dapat dicapai rangkaian VCO yang dibangun. Skema uji rangkaian VCO ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Pengujian Rangkaian *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi

Pada tahap akhir, proses kalibrasi dilakukan pada VCO yang telah dibangun. Proses ini dilakukan dengan cara sinyal keluaran VCO hasil perancangan dibandingkan terhadap sinyal keluaran *Signal generator*. Hal ini dilakukan guna melihat kesesuaian bentuk sinyal keluaran VCO pada amplitudo dan frekuensi tertentu. Skema pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Kalibrasi Sinyal Keluaran *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi

Keseluruhan pengujian yang dilakukan pada sistem yang dibangun masih terbatas pada pengamatan secara visual terkait bentuk sinyal, amplitudo serta rentang frekuensi yang dapat dibangkitkan oleh sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi rancang bangun *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi yang telah dibangun ditunjukkan pada Gambar 5.



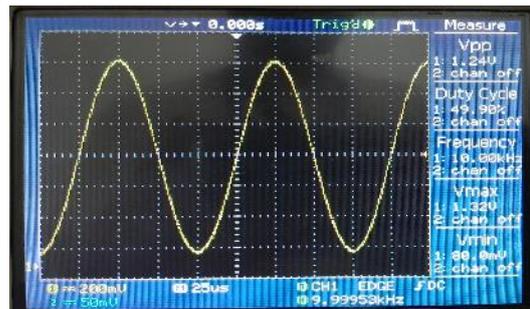
Gambar 5. Realisasi Rancang Bangun *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi (10kHz – 1MHz)

Pada tahapan awal dilakukan pengujian untuk melihat bentuk sinyal keluaran, amplitudo dan rentang frekuensi yang dapat

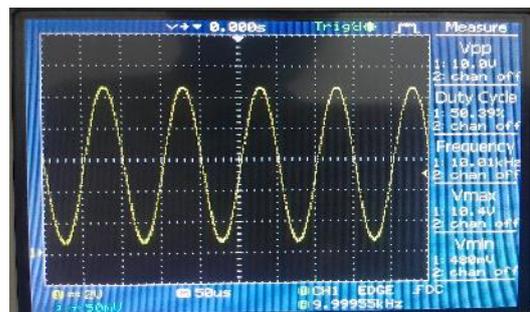
dibangkitkan oleh VCO hasil perancangan. Hasil pengujian VCO ditunjukkan secara berturut-turut pada Gambar 6.



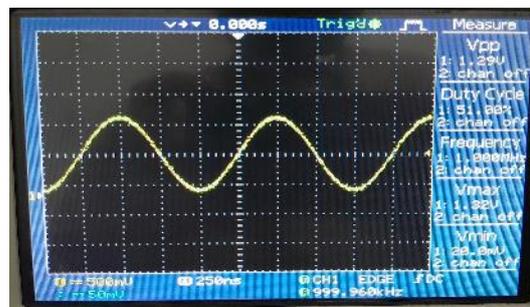
(a) Pengujian VCO Hasil Perancangan



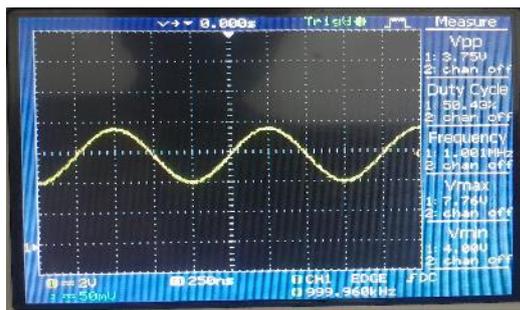
(b) Amplitudo Minimum Pada Frekuensi Minimum (10kHz)



(c) Amplitudo Maksimum Pada Frekuensi Minimum (10 kHz)



(d) Amplitudo Minimum Pada Frekuensi Maksimum (1 MHz)



(e) Amplitudo Maksimum Pada Frekuensi Maksimum (1 MHz)

Gambar 6. Hasil Pengujian *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi

Beberapa hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa, secara visual, sinyal keluaran memiliki bentuk sinusoidal sempurna yang konsisten. Pada frekuensi minimum 10 kHz, diperoleh tegangan *peak-to-peak* (V_{pp}) minimum berada pada 1.24 V dengan *duty cycle* sebesar 49.90%, sementara tegangan *peak-to-peak* (V_{pp}) maksimum yang dapat dibangkitkan berada pada 10 V dengan *duty cycle* 50.39%. Kestabilan *duty cycle* yang mendekati 50% menunjukkan efektivitas desain dalam mempertahankan keseimbangan sinyal.

Pada frekuensi maksimum 1 MHz, hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan *peak-to-peak* minimum berada pada 1.29 V dengan *duty cycle* 51.00%, sedangkan tegangan *peak-to-peak* maksimum yang dapat dibangkitkan berada pada 3.75 V dengan *duty cycle* 50.43%. Bila dibandingkan dengan hasil pengujian pada 10 kHz terlihat kenaikan *duty cycle* yang tidak signifikan pada frekuensi 1 MHz. Disisi yang lain terjadi penurunan amplitudo yang dapat dibangkitkan oleh sistem pada penggunaan frekuensi 1 MHz. Hal ini dapat disebabkan oleh keterbatasan *bandwidth* dari komponen aktif yang digunakan.

Hasil pengujian awal ini menunjukkan bahwa VCO multifrekuensi yang dirancang masih mampu memberikan kinerja yang baik dalam membangkitkan sinyal dengan karakteristik yang konsisten secara visual pada rentang frekuensi yang diuji. Hasil uji frekuensi keluaran *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi 10 kHz hingga 1 MHz dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Frekuensi Keluaran *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi (10kHz – 1MHz)

Frekuensi pada VCO (kHz)	Pembacaan Pada Osiloskop	
	Frekuensi (kHz)	Duty Cycle (%)
10	10.03	50.05
20	20.00	49.70
30	30.16	50.25
40	39.47	50.13
50	49.70	50.10
60	60.10	50.30
70	70.02	50.20
80	80.13	50.30
90	90.09	50.00
100	100.3	50.30
120	120.0	50.20
150	150.2	50.00
180	180.7	50.30
200	200.8	50.20
210	210.1	50.20
250	250.9	51.30
300	300.3	51.20
400	400.0	51.20
700	700.5	51.30
900	900.9	50.40
1000	1000	50.00
Rata-Rata Duty Cycle		50.36

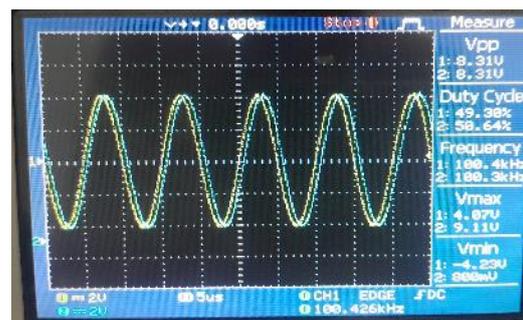
Dari pengujian frekuensi diperoleh *duty cycle* yang mendekati 50% pada setiap frekuensi uji. Hal ini mengindikasikan bahwa sinyal yang dihasilkan sistem sangat simetris dan konsisten dengan spesifikasi yang diharapkan. Variasi *duty cycle* tidak signifikan yang berkisar pada 49.70% hingga 51.30% mengindikasikan stabilitas yang baik dari sinyal keluaran. Secara keseluruhan, hasil pengujian frekuensi menunjukkan bahwa VCO multifrekuensi yang dirancang berfungsi dengan baik, dengan frekuensi yang akurat dan *duty cycle* yang stabil.

Pada tahap pengujian akhir, dilakukan evaluasi dengan membandingkan sinyal keluaran dari *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi hasil perancangan terhadap sinyal keluaran dari sebuah generator sinyal standar. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memvalidasi keakuratan dan kesesuaian sinyal keluaran yang dihasilkan oleh VCO hasil perancangan. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengatur frekuensi dan tegangan *peak-to-peak* dari VCO serta signal generator pada nilai yang sama, kemudian hasilnya ditampilkan

pada osiloskop. Hasil perbandingan antara keluaran VCO dan sinyal generator standar ditunjukkan pada Gambar 7, dan data hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.



(a) Pengujian Sinyal Keluaran VCO terhadap Signal Generator Standar

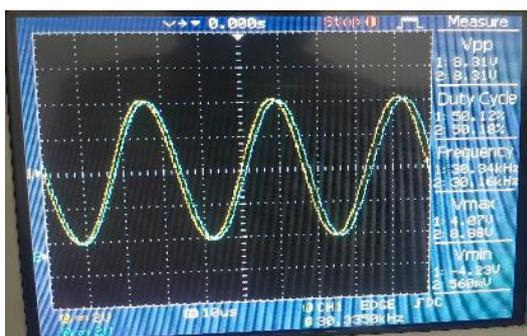


(e) $F = 100 \text{ kHz}$ dan $V_{pp} = 8.31 \text{ V}$

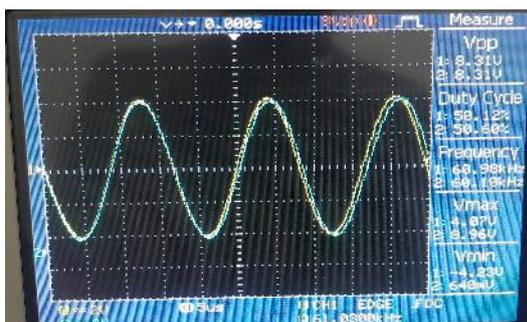
Gambar 7. Hasil Kalibrasi *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi Hasil Perancangan Terhadap Signal Generator Standar



(b) $F = 10 \text{ kHz}$ dan $V_{pp} = 8.31 \text{ V}$



(c) $F = 30 \text{ kHz}$ dan $V_{pp} = 8.31 \text{ V}$



(d) $F = 60 \text{ kHz}$ dan $V_{pp} = 8.31 \text{ V}$

Kalibrasi *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi hasil perancangan terhadap signal generator standar dilakukan pada rentang frekuensi 10 kHz hingga 100 kHz, walaupun VCO yang dibangun memiliki kemampuan membangkitkan frekuensi hingga 1 MHz. Pemilihan rentang frekuensi ini dikarenakan keterbatasan dari signal generator standar yang digunakan sebagai alat pembanding. Signal generator standar yang digunakan memiliki kemampuan menghasilkan frekuensi maksimal 100 kHz.

Tabel 4. Hasil Kalibrasi *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) Multifrekuensi Hasil Perancangan terhadap Signal Generator Standar

Frekuensi (kHz)	Hasil Pembacaan Pada Osiloskop			
	Frekuensi (kHz)		Duty Cycle (%)	
	VCO	SG	VCO	SG
10	10.00	9.94	50.50	49.70
20	20.04	19.96	49.85	49.39
30	30.16	30.34	50.18	50.12
40	39.97	40.45	49.92	49.35
50	49.70	50.31	50.20	50.01
60	60.10	60.98	50.60	50.12
70	70.03	70.13	50.42	50.21
80	80.13	79.74	50.48	49.92
90	90.09	91.18	50.45	50.10
100	100.3	100.4	50.64	49.30
Rata-Rata Error Frekuensi			VCO = 0.22 % SG = 0.75 %	
Rata-Rata Duty Cycle			VCO = 50.32 % SG = 49.82 %	

VCO : *Voltage-Controlled Oscillator*
 SG : *Signal Generator Standar*

Hasil kalibrasi *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi terhadap signal generator standar menunjukkan performa yang memuaskan dalam hal akurasi frekuensi dan konsistensi *duty cycle*. Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 4, VCO menghasilkan error frekuensi rata-rata sebesar 0.22% dan signal generator standar menghasilkan error frekuensi rata-rata sebesar 0.75%. Hasil ini menunjukkan bahwa VCO hasil perancangan memiliki akurasi frekuensi yang lebih baik dari signal generator standar. Namun, rata-rata error frekuensi yang dihasilkan masih dalam batas toleransi. Error frekuensi yang rendah mengindikasikan kualitas tinggi dari desain dan implementasi VCO yang dibangun.

Dari segi *duty cycle*, rata-rata pengukuran pada VCO adalah 50.32%, dan pada signal generator standar adalah 49.82%. Hasil ini menunjukkan bahwa VCO mampu mempertahankan kestabilan *duty cycle* yang konsisten di berbagai frekuensi uji. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi yang dibangun memberikan performa yang memadai dan dapat diandalkan sebagai sistem sumber tegangan eksitasi pada aplikasi *Electrical Impedance Tomography* (EIT). Akurasi frekuensi yang tinggi dan konsistensi *duty cycle* yang stabil memastikan bahwa VCO dapat mendukung kebutuhan pengukuran dan analisis yang presisi untuk sistem EIT.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO) multifrekuensi untuk sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) yang dibangun berhasil memenuhi spesifikasi yang diinginkan serta menunjukkan kinerja yang stabil dan andal. VCO yang dibangun mampu membangkitkan signal sinusoidal pada rentang frekuensi 10 kHz hingga 1 MHz, dengan akurasi yang sangat baik pada setiap frekuensi uji. Selain itu, kualitas signal yang dihasilkan menunjukkan kestabilan. Hal tersebut dapat dilihat dari *duty cycle* yang berada pada nilai sekitar 50% di berbagai frekuensi uji, walaupun terdapat variasi kecil pada beberapa frekuensi yang tinggi. Secara keseluruhan, VCO yang telah dibangun menunjukkan kemampuan yang sangat baik dalam membangkitkan signal

dengan rentang frekuensi yang lebar dan konsistensi signal yang stabil. Sehingga VCO yang telah dibangun dapat digunakan sebagai sumber signal eksitasi yang dapat digunakan pada sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) multifrekuensi.

Meskipun hasil pengujian menunjukkan bahwa VCO yang dibangun memiliki akurasi yang baik, kalibrasi tersebut hanya dilakukan dalam rentang frekuensi 10 kHz hingga 100 kHz karena keterbatasan pada signal generator standar yang digunakan sebagai pembanding. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan pengujian lebih lanjut dengan menggunakan alat pembanding yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan sinya dengan frekuensi hingga 1 MHz. Selain itu perlu untuk dilakukan pengujian dengan menggunakan *Spectrum Analyzer* untuk lebih memastikan kualitas signal yang dihasilkan oleh sistem. Langkah ini diharapkan dapat memastikan bahwa VCO yang dibangun mampu berfungsi dengan akurasi yang konsisten di seluruh rentang frekuensi yang tersedia dan dapat memperkuat validitas hasil pengujian secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Ke X-Y et al. 2022. Advances in electrical impedance tomography-based brain imaging. *Military Med Res.* **9**(1): 10.
- 2 Umbu ABS. 2022. Rancang Bangun *Voltage-Controlled Oscillator* (Vco) Untuk Sistem *Electrical Impedance Tomography* (EIT) Frekuensi Tunggal 20 KHz. *Technologia.* **13**(4): 326.
- 3 Harikumar R, Prabu R, Raghavan S. 2013. *Electrical Impedance Tomography* (EIT) and Its Medical Applications: A Review. **3**(4): .
- 4 Babikir Adam EE, Sathesh. 2021. Survey on Medical Imaging of *Electrical Impedance Tomography* (EIT) by Variable Current Pattern Methods. *JISMAL.* **3**(2): 82.
- 5 Umbu ABS. 2022. Rancang Bangun Sistem Pengatur Alur Injeksi Arus Dan Pengukuran Tegangan Untuk Sistem *Electrical Impedance Tomography*. *optika.* **6**(2): 111.

- 6 Wu J, Chen X, Ding Z. 2013. Digital biomedical electrical impedance tomography based on FPGA. *JBM*. **01**(02): 14.
- 7 Moro LC, Porto RW. 2015. Single frequency Electrical Impedance Tomography System with Offline Reconstruction Algorithm. *IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS 2015)*. .
- 8 Khalighi M, Vahdat BV, Mortazavi M, Mikaeili M. 2014. Design And Implementation Of Precise Hardware For Electrical Impedance Tomography (EIT). *IJST, Transactions of Electrical Engineering*. **38**: .
- 9 Rospawan A, Simatupang JW, Purnama I. 2021. A Simple, Cheap and Precise Microcontroller Based DDS Function Generator. *JEEE*. **3**(2): .
- 10 Umbu ABS. 2023. Desain Band Pass Filter Dengan Frekuensi Cut-Off 1 Khz Dan 100 Khz Untuk Sistem Electrical Impedance Tomography (EIT). *Orb. J. Pend. Ilm. Fis*. **9**(1): 58.
- 11 Pennati F et al. 2023. Electrical Impedance Tomography: From the Traditional Design to the Novel Frontier of Wearables. *Sensors*. **23**(3): 1182.
- 12 Brazey B, Haddab Y, Zemiti N, Mailly F, Nouet P. 2022. An open-source and easily replicable hardware for Electrical Impedance Tomography. *HardwareX*. **11**: e00278.
- 13 Chitturi V, Farrukh N. 2016. Development Of An Agilent Voltage Source For Electrical Impedance Tomography Applications. **11**(5): .
- 14 Graham BM, Adler A. 2007. Electrode placement configurations for 3D EIT. *Physiol. Meas*. **28**(7): S29.
- 15 Chitturi V, Farrukh N, Thiruchelvam V, Fei TK. 2014. A Low Cost Electrical Impedance Tomography (EIT) for Pulmonary Disease Modelling and Diagnosis. *SDIWC*. .
- 16 Maxim Integrated. 2007. MAX038 High-Frequency Waveform Generator.
- 17 EXAR Corporation. XR-2206 Monolithic Function Generator datasheet. .
- 18 National Semiconductor Corporation. 2000. LM741 Operational Amplifier. .
- 19 HARRIS Semiconductor Corporation. 1998. ICL8038 Datasheet. .
- 20 Analog Devices. 2019. AD9833 Datasheet.