

Perancangan dan Fabrikasi Sistem *Complex Impedance Analyzer* Berbasis *Chipset AD5933*

Ikhsan Nurdianis, Darmawan Hidayat, Nendi Suhendi Syafei

Departemen Teknik Elektro, Fakultas MIPA, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM. 21 Jatinangor 45363, Jawa Barat, Indonesia
ikhsannurdianis@gmail.com

Abstrak

Sistem *complex impedance analyzer* adalah sebuah perangkat pengukuran impedansi yang dapat diprogram untuk melakukan penyisiran frekuensi dari 10 hingga 100 kHz dengan jumlah penyisiran 10 titik pengukuran. Perangkat ini memungkinkan parameter impedansi suatu sistem fisis eksternal yang disebut sebagai *Device Under Test (DUT)* dapat diketahui dengan memberikan sinyal sinusoidal sesuai frekuensi yang telah ditentukan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat sistem *complex impedance analyzer* berbasis *chipset AD5933*. Respon frekuensi DUT dapat diperoleh dari hasil sampling *analog-to-digital converter (ADC)* dan komputasi *discrete fourier transform (DFT)* yang dilakukan oleh mesin DSP untuk mengembalikan data nilai real dan data nilai imajiner sinyal respon sistem DUT pada tiap nilai frekuensi yang ditentukan. Seluruh proses ini meliputi pembangkitan sinyal sinusoidal, konversi ADC, hingga komputasi DFT dilakukan di dalam *chipset AD5933*. Pengujian rangkaian kompleks orde pertama dengan resistor 10 k Ω dan kapasitor 470 pF yang dirangkai secara seri sebagai sampel DUT menghasilkan karakteristik magnitudo aktual $|Z|$ yaitu pada frekuensi tinggi. Kapasitor berperilaku sebagai *short circuit* sehingga magnitudo aktual $|Z|$ mendekati nilai R. Keadaan tersebut dibatasi oleh titik frekuensi *cut-off* dari respon frekuensi yang diperoleh. Hal tersebut berimplikasi kepada nilai fasa aktual $Z\phi$ yang semakin mendekati 0 $^\circ$.

Kata Kunci: *Complex Impedance Analyzer, Chipset AD5933, Device Under Test (DUT), frekuensi cut-off*

Abstract

The complex impedance analyzer system is an impedance measurement device that can be programmed to conduct frequency sweeping from 10 to 100 kHz with a total sweep of 10 measurement points. This device allows the impedance parameters of an external physical system called the Device Under Test (DUT) to be known by giving a sinusoidal signal according to a predetermined frequency. This study aims to design and create a complex impedance analyzer system based on the AD5933 chipset. The DUT frequency response can be obtained from the results of analog-to-digital converter (ADC) sampling and Discrete Fourier Transform (DFT) computing performed by the DSP machine to return the real value data and the imaginary value data of the DUT system response signal at each specified frequency value. The entire process includes the generation of sinusoidal signals, ADC conversion, to DFT computing performed on the AD5933 chipset. Testing of first order complex circuits with 10 k Ω resistors and 470 pF capacitors arranged in series as DUT samples yields the actual magnitude characteristics $|Z|$ i.e. at high frequency. Capacitors behave as short circuits so that the actual magnitude $|Z|$ approaching R. The state is limited by the cut-off frequency point of the frequency response obtained. This has implications for the actual phase value of Z which is getting closer to 0 $^\circ$.

Keywords: *Complex Impedance Analyzer, Chipset AD5933, Device Under Test (DUT), frekuensi cut-off*

I. PENDAHULUAN

Impedansi dapat didefinisikan sebagai respon yang diberikan oleh suatu rangkaian berupa tahanan total akibat pemberian sumber tegangan listrik sinusoidal [1]. Besaran impedansi dapat dinyatakan dalam bilangan kompleks terdiri dari dua parameter

utama dimana memiliki bagian riil (resistansi, R) dan bagian imajiner (reaktansi, X). Perangkat untuk mengukur dan menganalisis impedansi suatu rangkaian disebut *Complex Impedance Analyser* [2]. Perangkat ini mengukur nilai bagian riil dan bagian imajiner kemudian mengubahnya menjadi nilai parameter impedansi sistem seperti impedansi

absolut $|Z|$, pergeseran sudut fasa $Z\phi$, resistansi R , reaktansi X , dan admitansi G pada tiap nilai frekuensi sebagai representasi dari respon frekuensi [2]. Pengukuran impedansi dalam bentuk respon frekuensi dilakukan dengan menghubungkan perangkat dengan suatu rangkaian, sistem, atau objek yang disebut *unknown impedance* atau *Device Under Test* (DUT). Setiap sistem DUT memiliki karakteristik tertentu yang dapat dinyatakan dalam bentuk respon frekuensi. Pengguna menggunakan perangkat *Complex Impedance Analyzer* dengan tujuan untuk memperoleh respon frekuensi dari berbagai sistem DUT sehingga karakteristik suatu sistem dalam bentuk respon frekuensi dapat diamati untuk keperluan analisis sistem.

Beberapa makalah melaporkan penggunaan impedansi kompleks untuk berbagai aplikasi, seperti deteksi penggumpalan darah [3]-[4], analisis penyakit kulit [5], bio-impedansi [6]-[7], dan pengujian kerusakan dini beton [8]. *Complex Impedance Analyzer* komersial yang tersedia di pasaran saat ini sudah memiliki fungsi yang lengkap sebagai sebuah perangkat pengukuran impedansi. Namun demikian, perangkat ini memiliki dimensi yang cukup besar dan harga yang sangat mahal jika digunakan untuk beberapa aplikasi praktis yang melibatkan banyak lokasi pengukuran [9]-[11]. Dalam perkembangannya, *Complex Impedance Analyzer* sangat dibutuhkan untuk melakukan pengukuran di tempat yang sulit dijangkau, mampu berkomunikasi nirkabel dengan perangkat pengukuran lainnya, dan dapat dikendalikan menggunakan sistem berbasis komputer [12].

Sebagai salah satu komponen yang lengkap dalam pengukuran, *chipset (integrated circuit)* AD5933 merupakan solusi yang menarik dalam pengukuran impedansi [11]-[13]. *Chipset* AD5933 dipilih karena memiliki konsumsi daya yang rendah dan mudah diintegrasikan dengan pengontrol (mikrokontroler) dan DUT [12], [13]. Secara teknis, *chipset* AD5933 lebih praktis dan ekonomis digunakan sebagai perangkat *Complex Impedance Analyzer* untuk pengukuran impedansi listrik suatu sistem. *Chipset* AD5933 merupakan piranti yang kompak karena di dalam piranti ini dilengkapi dengan generator sinusoidal digital yang dibangun dari *direct-digital-synthesis* (DDS) lebar 27 bit dan *digital-to-analog converter* (DAC). Piranti ini juga dilengkapi dengan komponen pembaca sinyal sinusoidal respon DUT, yaitu pengubah arus ke tegangan, penguat, *low pass filter* (LPF), ADC 12-bit dan prosesor DFT 1024 titik.

Makalah ini melaporkan rancang bangun perangkat pengukuran impedansi listrik berbasis piranti AD5933 agar dimensi perangkat menjadi lebih kecil (*compact*) agar memudahkan dalam

mobilitas pengukuran (*portability*) dan dengan biaya yang relatif murah (*low-cost*). Pengukuran impedansi listrik suatu sistem menjadi sesuatu yang menarik untuk ditinjau karena besaran impedansi listrik (dalam bentuk respon frekuensi) dapat memberikan informasi tentang karakteristik sistem DUT yang diukur. Dengan begitu, impedansi dapat merepresentasikan DUT yang tidak diketahui sifat atau karakteristiknya melalui respon frekuensi sistem [14]-[15]. Motivasi untuk merancang dan membangun sebuah sistem instrumentasi yang dapat mengukur impedansi pada penelitian ini adalah untuk mengetahui informasi atau respon frekuensi dari uji sistem DUT kompleks orde pertama berbasis *chipset* AD5933 dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno.

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Perangkat Keras

Blok diagram rancangan sistem secara keseluruhan ditampilkan oleh Gambar 1. Sistem perangkat keras dibangun dengan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengontrol *chipset* AD5933 melalui protokol komunikasi I2C. *Push button* ditambahkan sebagai prosedur pengukuran pada perangkat yang dirancang. Untuk peraga nilai pengukuran, hasil pengukuran besaran impedansi ditampilkan secara pada suatu peraga *Liquid Crystal Display* (LCD). Frekuensi penyisiran (*swap frequency*) diprogram dalam rentang 10 kHz hingga 100 kHz dengan 10 titik pengukuran.

B. Perancangan Perangkat Lunak Pengontrol

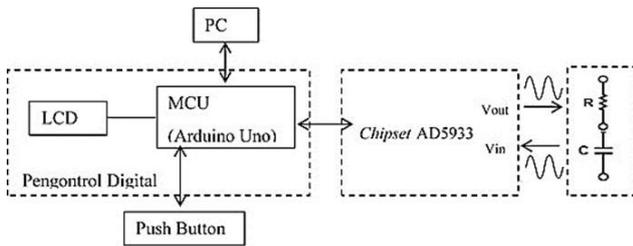
Chipset AD5933 memiliki kelebihan untuk melakukan perubahan frekuensi secara otomatis dengan menempatkannya pada mode penyisiran frekuensi hingga 100 kHz. Pengguna hanya perlu menginisiasi kode nilai frekuensi awal, kenaikan frekuensi, dan jumlah titik penyisiran [6]. Kode yang tersebut dapat dilakukan dengan mengontrol *chipset* AD5933 melalui mikrokontroler.

Perancangan perangkat lunak yang dibutuhkan terdiri dari dua tahap utama. Tahap tersebut diawali dengan mengatur konfigurasi dari *chipset* AD5933 yang terdiri atas osilator internal (MCLK) 16,776 MHz, frekuensi awal 10 kHz, kenaikan frekuensi 10 kHz, jumlah penyisiran 10, dan PGA *gain* 1. Tahap berikutnya adalah memprogram untuk mode penyisiran frekuensi mengikuti diagram alir pada Gambar 2.

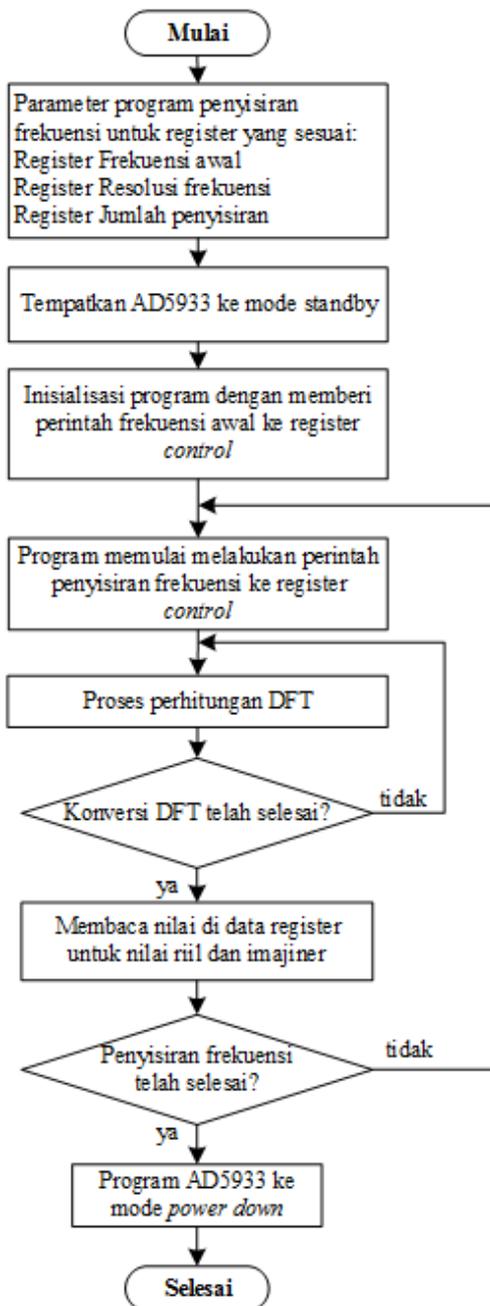
C. Perancangan Chipset AD5933

Chipset AD5933 merupakan sistem pengkonversi impedansi yang mengombinasikan

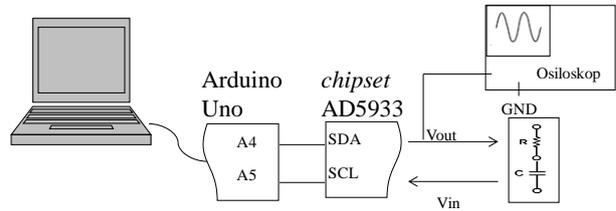
pembangkit sinyal sinusoidal dengan mesin *Digital Signal Processing* (DSP) dalam satu perangkat.



Gambar 1. Diagram blok *Complex Impedance Analyzer*



Gambar 2. Diagram alir program penyisiran frekuensi



Gambar 3. Perancangan sistem *chipset AD5933*

Respon sinyal berupa impedansi disampling oleh 12 bit, 1 MSPS ADC kemudian komputasi *Discrete Fourier Transform* (DFT) dilakukan dalam mesin DSP. Algoritma DFT mengkonversi data menjadi bagian real (*Re*) dan imajiner (*Im*) pada setiap titik penyisiran frekuensi (*frequency sweep*) [16].

Perancangan *Chipset AD5933* dilakukan dengan tujuan untuk menguji komunikasi data antara mikrokontroler Arduino Uno dengan *chipset AD5933*. Untuk mengamati adanya komunikasi antara keduanya, maka *chipset AD5933* harus mampu mengerjakan perintah dari pengontrol Arduino Uno yang diprogram oleh pengguna.

Gambar 3 memperlihatkan diagram blok pengujian *chipset AD5933*. Pin V_{OUT} pada AD5933 dihubungkan ke *channel 1* osiloskop dengan tujuan untuk memeriksa pin V_{OUT} mengeluarkan sinyal sinusoidal dengan frekuensi yang ditentukan oleh kode program yang ditentukan oleh pengguna.

Kedua terminal DUT dihubungkan ke pin V_{OUT} dan pin V_{IN} . Frekuensi sinyal sinusoidal V_{OUT} divariasikan dalam rentang 10 hingga 100 kHz. Selanjutnya, mikrokontroler membaca melalui serial monitor Arduino data berupa nilai riil (*Re*) dan imajiner (*Im*) hasil komputasi DFT dalam *chipset AD5933*. Nilai riil dan imajiner pembacaan tersebut merupakan representasi nilai impedansi pada frekuensi tertentu. Prosedur ini diulangi kembali sebanyak perulangan yang ditentukan oleh pengguna.

D. Pengolahan Data

Pengguna harus melakukan kalibrasi sistem AD5933 sebelum melakukan pengukuran terhadap DUT kompleks. Kalibrasi dilakukan terhadap komponen dengan impedansi yang telah diketahui kemudian *gain factor* dihitung sebagai representasi dari *gain* sistem keseluruhan. *Gain factor* dihitung mengikuti Persamaan (1) [16], [17].

$$Gain\ Factor = \frac{1}{\sqrt{R_{CAL}^2 + Im^2}} \quad (1)$$

dengan R_{CAL} merupakan impedansi yang diketahui yaitu nilai resistansi komponen resistor yang digunakan sebagai kalibrasi, sedangkan *Re* dan *Im*

adalah nilai hasil komputasi dari DFT *chipset* AD5933 yang dihasilkan. Magnitudo impedansi aktual $|Z|$ pada satu frekuensi tertentu dari DUT kompleks dapat diperoleh mengikuti Persamaan (2) [16], [17].

$$|Z|_{AKTUAL} = \frac{1}{\text{Gain factor} \times \text{Magnitudo DFT}} \quad (2)$$

Kemudian, fasa aktual $|Z| \phi^0$ dapat diperoleh ketika melakukan kalibrasi dengan resistor yang sama untuk memperoleh fasa sistem yang menjadi faktor pengurang dari fasa yang diperoleh dari DUT kompleks seperti Persamaan (3) dan Persamaan (4) [16], [17].

$$Z \phi = (\phi_{\text{unknown DUT}} - \phi_{\text{sistem}}) \quad (3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right) \quad (4)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

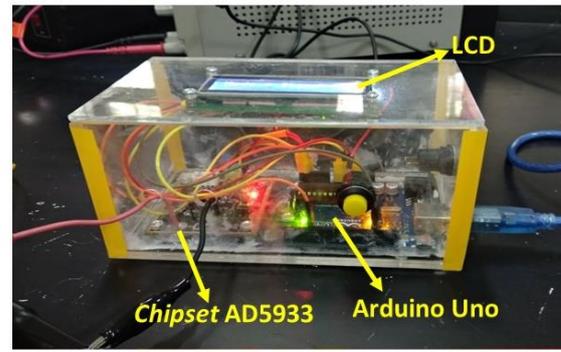
A. Implementasi Sistem

Wujud fisik perangkat diperlihatkan Gambar 4. Perangkat dikemas dalam wadah akrilik transparan. Sistem perangkat keras diimplementasikan sesuai dengan proses perancangan yang telah dilakukan sebelumnya.

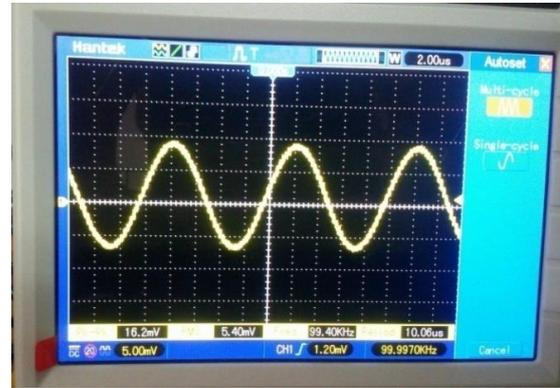
B. Pengujian Sistem

Gambar 5 memperlihatkan bentuk sinyal sinusoidal dari pin V_{OUT} *chipset* AD5933 yang diamati melalui osiloskop. Hasil keluaran sinyal sinusoidal yang ditampilkan pada Gambar 4 memiliki spesifikasi frekuensi 100 kHz. Sinyal sinusoidal tersebut dilewatkan ke DUT sehingga DUT memiliki suatu impedansi tertentu sebagai respon atas masukan sinyal sinusoidal. Bentuk sinyal respon DUT juga sinusoidal dengan amplitudo dan pergeseran fasa tertentu. Sinyal sinusoidal respon kemudian ditangkap kembali oleh *chipset* AD5933, diperkuat oleh suatu opamp, diubah menjadi sinyal digital oleh suatu *analog-to-digital converter* (DAC) untuk dihitung melalui algoritma discrete fourier transform (DFT) untuk menghasilkan nilai real (Re) dan imajiner (Im). Seluruh proses umpan balik tersebut dilakukan oleh masing-masing komponen internal AD5933.

Perlu diketahui bahwa nilai real (Re) dan imajiner (Im) tersebut merupakan hasil dari komputasi DFT dan bukan merujuk pada nilai dari komponen resistif dan nilai komponen reaktif dari DUT yang diujikan.

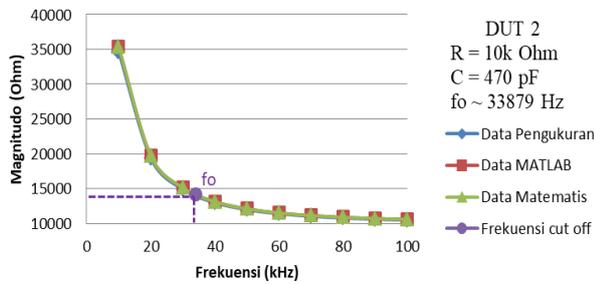


Gambar 4. Implementasi sistem

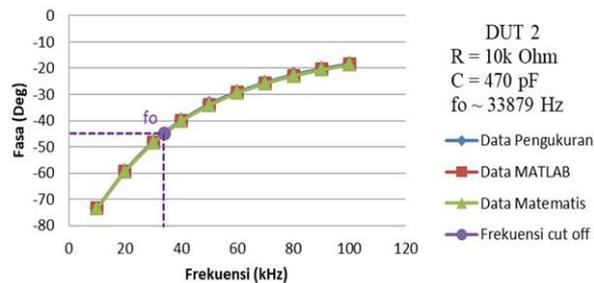


Gambar 5. Sinyal sinusoidal yang dibangkitkan oleh AD5933 untuk sinyal masukan bagi DUT

Rangkaian kompleks sebagai contoh sampel DUT adalah resistor 10 k Ω dan kapasitor 470 pF yang dirangkai seri. Hasil pengukuran magnitudo aktual $|Z|$ untuk DUT tersebut ditampilkan oleh Tabel 1. Informasi pada Tabel 1 menjelaskan bahwa nilai-nilai riil (Re) dan imajiner (Im) hasil komputasi DFT juga perhitungan nilai magnitudo DFT yang diperoleh telah sesuai dengan Persamaan (2). Pernyataan tersebut dapat disimpulkan dari nilai magnitudo aktual $|Z|$ yang terukur. Hasil pengujian menunjukkan nilai magnitudo hasil perhitungan DFT semakin besar seiring meningkatnya nilai frekuensi, namun nilai magnitudo aktual $|Z|$ akan semakin mengecil. Hal tersebut dibuktikan dengan representasi respon frekuensi dari magnitudo aktual yang ditunjukkan oleh Gambar 6. Berdasarkan hasil Gambar 6, karakteristik sistem dapat diketahui bahwa magnitudo aktual $|Z|$ untuk frekuensi rendah meningkat dan untuk pada frekuensi tinggi nilai magnitudo aktual $|Z|$ menurun (minimum). Hasil ini sesuai dengan perilaku sistem RC seri. Hal tersebut akibat komponen kompleks kapasitor 470 pF yang memiliki reaktansi kapasitif $X_c = -\frac{1}{j2\pi fC}$ yang berbanding terbalik dengan frekuensi.



Gambar 6. Perbandingan respon frekuensi dari DUT orde pertama dengan magnitudo aktual



Gambar 7. Perbandingan respon frekuensi dari DUT orde pertama dengan fasa aktual

Apabila dilihat dari persamaan reaktansi kapasitif X_C semakin tinggi frekuensi yang diberikan maka nilai reaktansi akan mendekati nol dan nilai magnitudo aktual berada pada kondisi $|Z| \approx R$. Keadaan $|Z| \approx R$ tersebut terjadi di suatu titik frekuensi dalam rentang frekuensi 10 hingga 100 kHz. Titik tersebut dapat diketahui dengan nilai frekuensi *cut off* (f_0) sebesar $1/(2\pi RC)$ yang berada di $f \approx 33879$ Hz. Frekuensi *cut off* (f_0) diperlukan dengan tujuan untuk mengetahui titik frekuensi yang menjadi batas untuk melewati atau menghalangi sinyal masukan yang mempunyai frekuensi yang lebih tinggi ataupun frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi *cut off* (f_0). Untuk melakukan validasi hasil pengukuran yang diperoleh, maka hasil pengukuran yaitu

dibandingkan dengan perhitungan. Data perhitungan diperoleh dari perangkat lunak MATLAB dan perhitungan matematis dengan tujuan seberapa dekat nilai hasil pengukuran yang ingin diketahui oleh pengguna dengan hasil yang ideal. Pada Tabel 1 diketahui bahwa hasil pengukuran magnitudo aktual $|Z|$ dengan perangkat *complex impedance analyzer* yang dirancang telah sesuai dengan hasil ideal. Hal tersebut diketahui dari nilai kesalahan relatif (KSR) maksimum pada hasil pengukuran magnitudo aktual $|Z|$ adalah $\approx 1,88\%$. Nilai KSR dihitung dari perbandingan selisih hasil pengukuran dan perhitungan dikali 100%. Perbedaan hasil perhitungan antara MATLAB dan perhitungan matematis mungkin disebabkan penentuan ketelitian nilai konstanta ϕ (π).

Sementara untuk respon frekuensi dari fasa aktual $Z\phi$ diperoleh dari hasil pengukuran untuk nilai real (Re) dan imajiner (Im) yang sama. Tabel 2 merupakan hasil pengukuran fasa aktual $Z\phi$ dari DUT yang diujikan. Apabila fasa tunggal dari komponen kapasitor berada di -90° di setiap titik frekuensi, maka pada rangkaian kompleks orde pertama yang difungsikan sebagai DUT pada penelitian ini membuktikan bahwa fasa aktual bergeser menuju nol derajat akibat pengaruh komponen resistor yang dimilikinya. Sementara perbandingan fasa aktual hasil pengukuran dengan hasil perhitungan matematis dinyatakan dengan nilai KSR. Hasil perbandingan antara pengukuran dan perhitungan menunjukkan nilai KSR maksimum adalah sekitar 2,26%. Dari hasil pengujian dan perhitungan dapat disimpulkan bahwa perangkat *complex impedance analyzer* yang dirancang telah mampu mengukur magnitudo aktual dan fasa aktual dengan baik. Gambar 7 merupakan representasi yang lengkap untuk respon fasa aktual $Z\phi$ terhadap frekuensi yang diperoleh.

Tabel 1. Hasil pengukuran magnitudo aktual $|Z|$ dari DUT kompleks orde pertama ($R=10k\Omega$, $C=470pF$)

f (kHz)	Re	Im	$ Z $ DFT	$ Z $ Aktual	$ Z $ Matlab	$ Z $ Matematis	KSR $ Z $
10.000	2.582	1.089	2.802,26	34.659,07	35.295	35.324,91	1,88
20.000	3.640	3.440	5.008,31	19.388,90	19.658	19.671,36	1,44
30.000	3.194	5.675	6.512,09	14.884,85	15.077	15.084,39	1,32
40.000	1.936	7.218	7.473,13	12.979,90	13.100	13.104,98	0,95
50.000	349	8.077	8.084,54	11.960,09	12.076	12.079,48	0,99
60.000	-1.240	8.388	8.479,16	11.379,96	11.482	11.484,17	0,91
70.000	-2.733	8.303	8.741,23	11.013,52	11.108	11.109,70	0,87
80.000	-4.105	7.914	8.915,29	10.764,67	10.858	10.859,79	0,88
90.000	-5.294	7.315	9.029,71	10.585,48	10.684	10.685,08	0,93
100.000	-6.326	6.543	9.101,05	10.474,87	10.557	10.558,33	0,79

Tabel 2. Hasil pengukuran fasa aktual $Z\phi$ dari DUT kompleks orde pertama ($R=10k\Omega$, $C=470pF$)

f (kHz)	Re	Im	$Z\phi$ DUT	$Z\phi$ Sistem	$Z\phi$ Aktual	$Z\phi$ Matlab	$Z\phi$ Matematis	KSR $Z\phi$
10.000	2.582	1.089	22,87	96,19	-73,31	-73,51	-73,51	0,26
20.000	3.640	3.440	43,40	102,43	-59,03	-59,39	-59,39	0,61
30.000	3.194	5.675	60,65	108,66	-48,00	-48,43	-48,43	0,87
40.000	1.936	7.218	75,02	114,91	-39,89	-40,22	-40,22	0,82
50.000	349	8.077	87,57	121,14	-33,57	-34,08	-34,08	1,49
60.000	-1.240	8.388	98,36	127,36	-29,00	-29,41	-29,41	1,41
70.000	-2.733	8.303	108,18	133,61	-25,43	-25,79	-25,79	1,39
80.000	-4.105	7.914	117,38	139,84	-22,45	-22,92	-22,92	2,03
90.000	-5.294	7.315	125,86	146,06	-20,20	-20,60	-20,60	1,95
100.000	-6.326	6.543	134,01	152,28	-18,27	-18,69	-18,69	2,25

IV. KESIMPULAN

Perangkat *complex impedance analyzer* yang dirancang telah direalisasikan. Perangkat mampu mengukur besaran impedansi yang digunakan untuk mengetahui respon frekuensi dari rangkaian kompleks orde pertama yaitu resistor dan kapasitor yang dirangkai seri sebagai sampel dalam penelitian ini. Karakteristik magnitudo aktual $|Z|$ pada frekuensi tinggi, mengakibatkan kapasitor berperilaku sebagai *short circuit* sehingga magnitudo aktual $|Z|$ jatuh pada nilai R. Keadaan tersebut dibatasi oleh titik frekuensi *cut-off* dari respon frekuensi yang diperoleh. Hal tersebut berimplikasi kepada nilai fasa aktual $Z\phi$ yang semakin mendekati nol derajat. Keadaan tersebut bergantung pula pada nilai kapasitansi yang DUT.

REFERENSI

- [1] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of Electric Circuit Fifth Edition*, New York: Mc Graw Hill, 2013.
- [2] Keysight Technologies, *Impedance Measurement Handbook A guide to Measurement technology and techniques 6th Edition, Application Note*. USA: Keysight Technologies. 2016.
- [3] H. Berney and J. J. O'Riordan, "Impedance Measurement Monitors Blood Coagulation," *Analog Dialogue*, vol. 42-08, pp. 1-3, 2008.
- [4] J. Ferreira, F. Seoane, A. Ansele and R. Bragos, "AD5933-based Spectrometer for Electrical Bioimpedance Applications". *Journal of Physics: Conference Series* 224, 012011, pp. 1-4, 2010.
- [5] D. K. Kamat, A. P. Chavan, and P. M. Patil, "Bio-Impedance Measurement System for Analysis of Skin Diseases," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, vol. 3, no. 2, pp. 92-96, 2014.
- [6] P. D. Shimpi and D. M. Yadav, "Bio-impedance Detection Using AD5933 Impedance Converter Analyzer", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, no. 7, pp. 1011-1014, 2013.
- [7] U. Pliquet and A. Barthel, "Interfacing the AD5933 for bio-impedance measurements with front ends providing galvanostatic or potentiostatic excitation," *Journal of Physics: Conference Series* 407, 012019, pp. 1-4, 2012.
- [8] C. P. Providakis, E. V. Liarakos, and E. Kampionakis, "Nondestructive Wireless Monitoring of Early-Age Concrete Strength Gain Using an Innovative Electromechanical Impedance Sensing System," *Smart Materials Research*, vol. 2013, pp. 1-10, 2013.
- [9] A. A. Ali, A. Elwakil, A. Ahmad, and B. Maundy, "Design of a Portable Low-Cost Impedance Analyzer," *Proceedings of the 10th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2017)*, pp. 104-109, 2017.
- [10] J. Hoja and G. Lentka, "Portable Analyzer for Impedance Spectroscopy," *Fundamental and Applied Metrology on XIX IMEKO World Congress*, Lisbon, Portugal, September 2009.
- [11] K. Chabowski, T. Piasecki, A. Dzierka, and K. Nitsch, "Simple Wide Frequency Range Impedance Meter Based on AD5933 Integrated Circuit", *Metrology and Measurement Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 13-24, 2015.
- [12] N. J. Djermanova, J. G. Kiss'ovski, and V. A. Vatchkov, "Portable Arduino-Based LCR Meter," *Annual Journal of Electronics*, vol. 2014, pp. 170-173, 2014.
- [13] L. Matsiev, "Improving Performance and Versatility of Systems Based on Single-Frequency DFT Detectors Such as AD5933," *Electronics*, vol. 4, pp. 1-34, 2015.
- [14] S. A. Ghaffari, W. O. Caron, M. Loubier, C. O. Normandeau, J. Viens, M. S. Lamhamedi, B. Gosselin and Y. Messaddeq, "Electrochemical Impedance Sensors for Monitoring Trace Amounts of NO_3 in Selected Growing Media," *Sensors*, vol. 15, pp. 17715-17727, 2015.
- [15] J. Ding, X. Sun, Y. Guo, H. Jia, L. Qiao, and X. Wang, "A Portable Pesticide Residues Detection Instrument Based on Impedance Immunosensor,"

- Sensors & Transducers*, vol. 172, no. 6, pp. 27-33, 2014.
- [16] M. Usach, "How to Configure the AD5933/AD5934," *Analog Devices AN-1252 Application Note*, pp. 1-12, 2013.
- [17] S. Brennan, "Measuring a Grounded Impedance Profile Using the AD5933," *Analog Devices AN-847 Application Note*, pp. 1-12, 2006.