

## Perancangan dan Simulasi Sensor Volume Zat Cair berbasis Metamaterial Rektangular

### *Designing and Simulating Liquid Volume Sensor Based on Rectangular Metamaterial*

Romi Fadli Syahputra<sup>a\*</sup>, Nurul Aisah<sup>a</sup>, Debi Yana<sup>a</sup>, Rofiqotul Husna<sup>a</sup>, Delovita Ginting<sup>a</sup>, Neneng Fitriya<sup>a</sup>,  
Iwantono<sup>b</sup>, Saktioto<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Fisika FMIPA dan Kesehatan Universitas Muhammadiyah Riau, Jl. Tuanku Tambusai,  
Pekanbaru, Riau, Indonesia

<sup>b</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau, Jl. HR. Soebrantas Km 12.5, Pekanbaru, Riau, Indonesia

\*Email : [romifadli@umri.ac.id](mailto:romifadli@umri.ac.id)

(Received 23 August 2023; Revised 17 November 2023; Accepted 28 November 2023; Published 30  
November 2023)

#### Abstrak

Pengukuran volume zat cair yang sensitif dapat dicapai menggunakan sensor berbasis metamaterial. Akan tetapi sensor volume zat cair tidak banyak dikembangkan, padahal pengukuran volume berdampak langsung pada nilai ekonomis, keberhasilan penelitian ilmiah, dan kemanjuran dosis obat. Penelitian yang telah dilakukan hanya sebatas pada pengukuran pada kenaikan permukaan zat cair dalam kenaikan tandon menggunakan sensor fotodiode. Metamaterial telah banyak dikembangkan sebagai sistem sensor yang sensitif karena berbasis gelombang elektromagnetik, namun belum spesifik dikaji-sebagai sensor volume zat cair. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan menyimulasikan penggunaan sensor metamaterial yang sensitif dalam pengukuran volume zat cair. Sensor didesain dengan prinsip *split ring resonator* berbentuk rektangular (SRR-R) yang terdiri dari cincin logam tembaga dan substrat FR4-Epoxy. Sensor SRR-R disimulasikan pada rentang frekuensi 350-850 MHz untuk mendeteksi perubahan volume zat cair (akuades, air tawar dan etanol) dari 5 - 44 mL. Hasil simulasi menunjukkan terjadinya pergeseran frekuensi resonan spektrum S21 yang jelas untuk masing-masing zat cair. Pergeseran frekuensi resonan untuk sampel akuades terjadi pada frekuensi 403 - 527 MHz, air tawar 403 - 528 MHz, dan etanol 60 - 783 MHz. Distribusi medan E dan medan H menunjukkan nilai maksimum sebesar  $18.662 \text{ V.m}^{-1}$  dan  $43.771 \text{ A.m}^{-1}$ . Karakteristik kurva linier terjadi dalam rentang volume 12-44 mL untuk semua sampel zat cair. Sensor metamaterial SRR-R berhasil disimulasikan untuk mendeteksi perubahan volume zat cair dengan sensitivitas pengukuran akuades  $-1,3999 \text{ MHz/mL}$ , air tawar  $-2,6833 \text{ MHz/mL}$ , dan etanol  $-3,5685 \text{ MHz/mL}$ . Sensor metamaterial SRR-R lebih sensitif dalam mengukur volume zat cair jika dibandingkan dengan pengukuran dengan sensor ultrasonik.

Kata kunci: sensor metamaterial, *split ring resonator* rektangular (SRR-R), volume zat cair

#### Abstract

*Sensitive measurement of liquid volume was done using a metamaterial-based sensors. However, liquid volume sensors have not developed much, although volume measurement has a direct impact on economic value, scientific research success, and drug dose efficacy. This research is only limited to measuring the rise in the surface of the liquid when the reservoir rises. using a photodiode sensor. Metamaterials have been widely developed as sensitive sensor systems because they are based on electromagnetic waves, but have not been specifically studied as liquid volume sensors. The aim of this research is to design and simulate a sensitive metamaterial sensor to measure liquid volume. The sensor is designed on the principle of a rectangular separated ring resonator (SRR-R) consisting of a copper metal ring and an FR4-Epoxy substrate. The SRR-R sensor is simulated in the frequency range 350-850 MHz to detect changes in liquid volume (aquades, clean water, and ethanol) from 5 - 44 mL. The simulation results show that there is a clear shift in the resonance frequency of the S21 spectrum for each liquid. Shifts in the resonant frequency of distilled water occurred at frequencies of 403 - 527 MHz, fresh water at 403 - 528 MHz, and ethanol at 603 - 783 MHz. The distribution*



of the  $E$  field and the  $H$  field shows a maximum value of  $18662 \text{ V.m}^{-1}$  and  $43771 \text{ A.m}^{-1}$ . The characteristic linear curve occurs in the volume range of 12-44 mL for all samples. The SRR-R metamaterial sensor was successfully simulated to detect changes in liquid volume with a measurement sensitivity of  $-1.3999 \text{ MHz/mL}$  for distilled water,  $-2.6833 \text{ MHz/mL}$  for fresh water, and  $-3.5685 \text{ MHz/mL}$  for ethanol.

**Keywords:** metamaterial sensor, liquid volume, split ring resonator rectangular (SRR-R).

## 1. Latar Belakang

Pentingnya pengukuran volume zat cair yang sangat sensitif dan akurat, karena sensor volume zat cair menentukan berapa besar nilai ekonomis satu produk hingga penentuan dosis obat. Harga jual bahan bakar ditentukan oleh besar volume dispenser sehingga jika terjadi kesalahan pengukuran akan berdampak pada nilai ekonomis. Bahkan dalam bidang medis, ketidakakuratan penentuan dosis obat mengakibatkan bertambah parahnya penyakit hingga kematian [1,2].

Volume zat cair statis biasanya diukur menggunakan gelas ukur dan mikro pipet, sedangkan untuk zat cair dinamis diukur menggunakan *flow meter* [3]. Gelas ukur bervolume 100 mL memiliki sensitivitas pengukuran sebesar 1 mL/mm dan 0,2 mL/mm untuk gelas ukur 10 mL [4]. Silinder ukur yang lebih kecil mengukur lebih teliti dari pada silinder yang lebih besar [5].

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk memperediksi volume zat cair, khususnya bahan bakar dan ketinggian level air, menggunakan perubahan ketinggian zat cair yang diukur melalui sensor. Peneliti Anjarsari dkk mengembangkan sensor fotodiode untuk mendeteksi ketinggian air dalam tandon secara non kontak [6]. Sensor ultrasonik juga dapat dimanfaatkan untuk pengukuran volume zat cair secara tidak langsung [7,8]. Namun sensitivitas pengukuran volume zat cair belum tinggi sehingga alternatif sensor lain yang sensitivitas perlu dikembangkan.

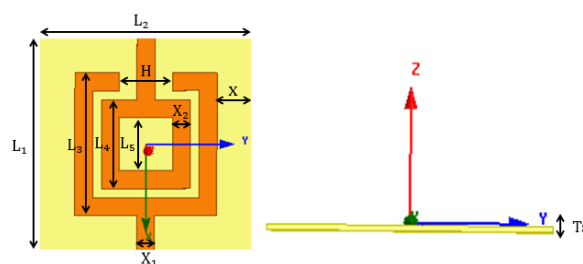
Sensor berbasis gelombang elektromagnetik, seperti metamaterial, telah banyak dikembangkan di berbagai bidang dan memiliki akurasi maupun sensitivitas yang sangat baik. Shalaev dan Cai [9] dan Abdulkarim dkk [10] melaporkan metamaterial dapat digunakan untuk mendeteksi zat seperti padat atau cair. Banyak peneliti memanfaatkan gelombang mikro sebagai frekuensi kerja sensor karena mampu mendeteksi konsentrasi larutan cair yang akurat, tidak merusak dan ekonomis [11,12]. Keunggulan metamaterial yang menarik adalah desain struktur yang sama dapat digunakan untuk beberapa fungsi sekaligus, misalnya detektor dan antena sekaligus [13], hanya

diperlukan penyesuaian ukuran struktur dan jenis material. Namun, sensor metamaterial yang telah diteliti belum mengkaji penggunaannya sebagai sensor volume zat cair.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki penggunaan sensor metamaterial sebagai sensor volume zat cair. Sensor volume ini merupakan salah satu instrumen baru berbasis metamaterial elektromagnetik untuk mengukur volume zat cair. Struktur metamaterial dirancang dalam bentuk rektanguler yang terdiri atas inklusi logam tembaga dan FR4-Epoxy sebagai substrat. Kinerja sensor disimulasikan pada frekuensi kerja 350- 850 MHz. Sensor volume zat cair diharapkan dapat memiliki sensitivitas yang baik.

## 2. Metodologi

Rancangan struktur dibuat menggunakan bantuan *Software* HFSS. Desain sensor volume zat cair berdasarkan penelitian dari Saadeldin dengan desain sensitivitas yang tinggi [14]. Gambar 1 menunjukkan rancangan sensor SRR-R berbentuk cincin persegi ganda dengan struktur inklusi logam setebal 0,035 mm di atas substrat FR4-Epoxy.



**Gambar 1.** Desain struktur metamaterial, tampak atas (kiri) dan sisi samping.

Desain sensor berbentuk persegi memiliki ukuran substrat FR4-Epoxy  $L_1$  (60 mm) dan  $L_2$  (60 mm), setelah tebal substrat  $T_s$  (1,6 mm). sementara inklusi logam tembaganya sebagai berikut  $L_3$  (40 mm),  $L_4$  (26 mm),  $X_1$  (22 mm),  $X_2$  (15 mm),  $X_3$  (2 mm).

### 2.1 Analisis Data Parameter S

Data parameter  $S$  yang diperoleh dianalisis secara statistik untuk menentukan regresi linearitas dan sensitivitas. Sensitivitas sensor  $S$



didapat dari nilai gradien kurva linier frekuensi terhadap volume zat cair yang dinyatakan oleh Persamaan 1 [15]:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta V} = \text{slope kurva } f \text{ vs } V \quad (1)$$

dimana  $\Delta f$  adalah pergeseran frekuensi dan  $\Delta V$  adalah perubahan volume zat cair. Sementara untuk mendeskripsikan kinerja sensor menggunakan faktor.  $Q$ -value dapat dihitung menggunakan Persamaan 2 :

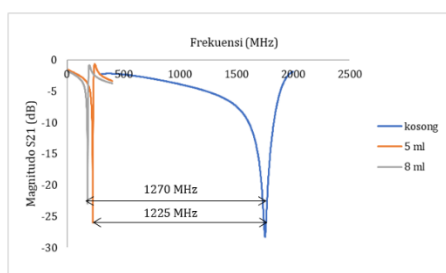
$$Q - \text{value} = \frac{f_0}{FWHM} \quad (2)$$

dimana *Full Width at Half Maximum (FWHM)* merupakan parameter bentuk kurva saat amplitudonya maksimum dan  $f_0$  adalah frekuensi pusat resonansi [16].

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Profil Parameters S21

Gambar 2 menampilkan profil parameter S21 saat volume kosong, 5 mL dan 8 mL. Perubahan volume zat cair memberikan pergeseran frekuensi resonan spektrum S21. Parameter S21 merupakan spektrum transmisi gelombang elektromagnetik melalui sensor dan sampel uji [17]. Pergeseran frekuensi saat volume zat cair 5 mL dan 8 mL masing-masing 1.225 MHz dan 1.270 MHz. Hasil ini menyebabkan pergeseran merah (*red-shift*) seiring peningkatan volume zat cair. Artinya, peningkatan jumlah zat cair yang berinteraksi dengan sensor menyebabkan frekuensi resonan cenderung bergeser ke frekuensi yang lebih rendah. Sementara hasil penelitian Pandit dkk yang menggunakan sensor metamaterial plasmonik berhasil mendeteksi konsentrasi glukosa dengan pergeseran biru (*blue-shift*) dan lebar pita frekuensi resonan  $\pm 3$  GHz untuk cairan glukosa dengan konsentrasi antara 50 mg/mL sampai 100 mg/mL [18].

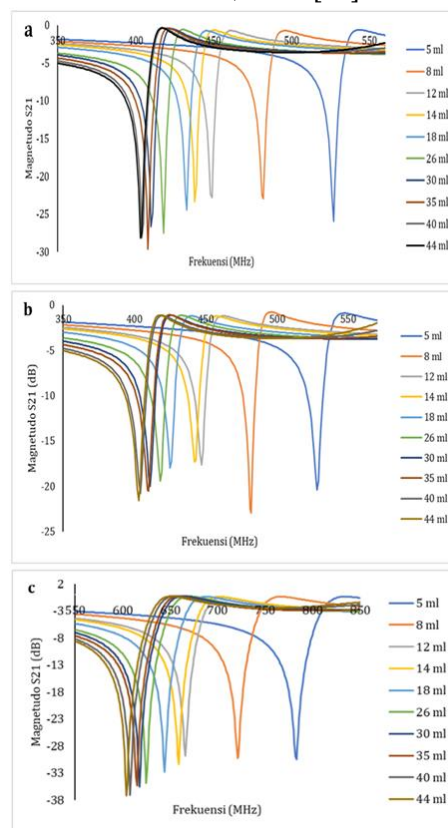


**Gambar 2.** Profil parameter S21 zat cair akuades.

Gambar 3 menunjukkan terjadinya pergeseran frekuensi resonan yang signifikan

untuk masing-masing zat cair. Sensor metamaterial SRR-R merespon perubahan volume zat cair dengan baik. Pergeseran frekuensi resonan untuk akuades terjadi dalam rentang 403-527 MHz, air tawar 403-528 MHz, dan etanol 603 MHz–783 MHz pada Gambar 3(a), 3(b) dan 3(c), secara berurut.

Penelitian Cai dkk mengenai sensor metamaterial untuk mendeteksi mikrofluida *polydimethylsiloxane* (PDMS) memperoleh lebar pita pergeseran frekuensi resonan  $\pm 0,17$  GHz [19]. Penelitian Govind dan Akhtar melaporkan bahwa sensor metamaterial mampu mendeteksi konsentrasi glukosa dalam larutan encer dengan pergeseran frekuensi  $\pm 0,4$  GHz [20].



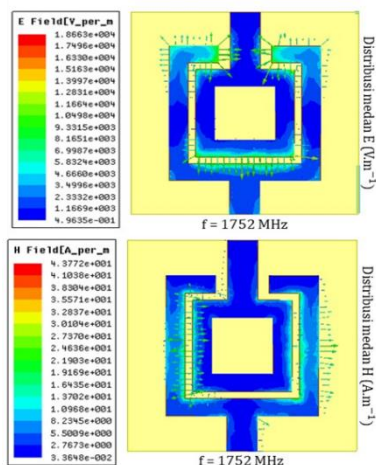
**Gambar 3.** Magnitudo parameter S21 untuk masing-masing volume zat cair (a) akuades, (b) air tawar dan (c) etanol.

#### 3.2 Distribusi Medan Listrik dan Magnet

Distribusi medan listrik  $E$  dan medan magnet  $H$  ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai terbesar disipasi medan  $E$  dan  $H$  terjadi saat frekuensi resonan 1.752 MHz. Besar medan  $E$  dan  $H$  menandakan besaran disipasi energi elektromagnetik pada material [21]. Nilai terbesar diperoleh disipasi medan  $E$  dan  $H$  sebesar  $18.662 \text{ V.m}^{-1}$  dan  $43.771 \text{ A.m}^{-1}$ . Medan listrik  $E$  terbesar terjadi di celah cincin logam, sementara medan magnetik  $H$  terkonsentrasi di sisi



luar cincin. Perubahan orientasi dan besar medan  $E$  dan  $H$  menandakan sensor metamaterial juga dapat diaplikasikan sebagai antenna dan biosensor [22,23].



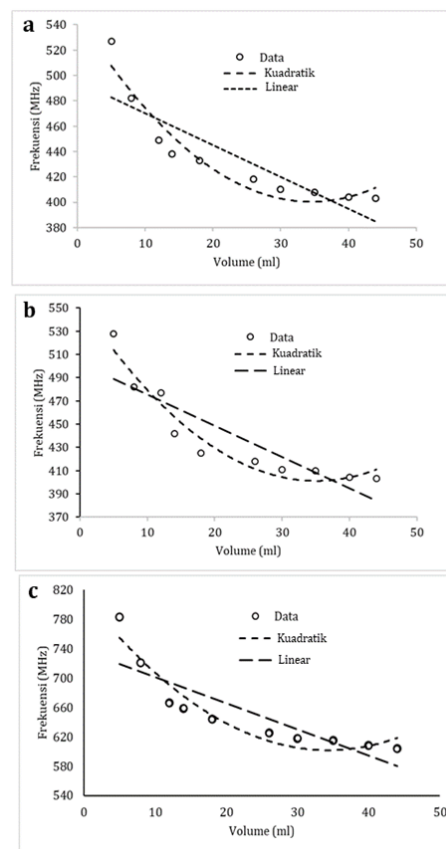
**Gambar 4.** Distribusi medan listrik ( $E$ ) dan magnet ( $H$ ) pada frekuensi resonansi SRR-Rektanguler.

### 3.3 Pergeseran Frekuensi Resonansi

Gambar 5 menunjukkan *plot* pergeseran frekuensi resonansi terhadap perubahan volume pada masing-masing zat cair. Simbol bulatan menunjukkan data hasil pengukuran, sementara garis putus-putus adalah kurva *fitting plot*. Gambar 5 menunjukkan pergeseran frekuensi resonansi lebih mendekati bentuk kurva kuadratik dengan koefisien korelasi  $R^2$  sebesar 0,9202–0,9377. Meskipun, *fitting plot* kurva linier juga cukup baik dengan koefisien korelasi  $R^2$  sebesar 0,7328–0,9273. Karakteristik kurva linier ini teramati mulai volume 8 mL untuk semua zat cair. Karakteristik kurva linear atau linearitas hasil pengukuran sensor merupakan gambaran kemudahan dalam proses kalibrasi sensor.

### 3.4 Analisis Regresi

Hasil analisis regresi kurva *fitting plot* untuk ketiga zat cair dirangkum pada Tabel 1. Sensitivitas sensor diindikasikan oleh koefisien regresi linear  $a_1$ . Pengukuran volume ketiga zat cair



**Gambar 5.** Pergeseran frekuensi resonansi parameter  $S_{21}$  untuk masing-masing volume zat cair (a) akuades, (b) air tawar dan (c) etanol.

menggunakan sensor SRR-R memberikan sensitivitas -1,3999 sampai -3,5685 MHz/mL. Tanda negatif menunjukkan bahwa peningkatan volume zat cair menyebabkan menurunnya frekuensi resonansi sensor.

Penelitian Pandit dkk [18] mengemukakan bahwa sensor metamaterial gelombang mikro dapat digunakan untuk mendeteksi konsentrasi glukosa dalam bentuk cairan. Sensor tersebut mampu bekerja dalam empat *band* sekaligus dengan linearitas yang tinggi. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Juan dkk [24] juga mengkonfirmasi sensor metamaterial mampu

**Tabel 1.** Parameter regresi kurva pergeseran frekuensi resonansi

Sampel	Jenis Persamaan	Persamaan	$a_0$ (MHz)	$a_1$ (MHz/mL)	$a_2$ (MHz/mL <sup>2</sup> )	$R^2$
Akuades	Linear	$a_1x+a_0$	458,7	-1,3999	-	0,9273
	Kuadratik	$a_2x^2+a_1x+a_0$	547,2	8,5104	0,1233	0,9276
Air tawar	Linear	$a_1x+a_0$	502,25	-2,6833	-	0,7686
	Kuadratik	$a_2x^2+a_1x+a_0$	554,46	8,7339	0,1244	0,9377
Etanol	Linear	$a_1x+a_0$	737,09	-3,5685	-	0,7328
	Kuadratik	$a_2x^2+a_1x+a_0$	811,95	12,244	0,1783	0,9202



mendeteksi glukosa dalam volume kecil dengan sensitivitas terbaik sebesar 0,047 dB.

Perbandingan sensitivitas pengukuran volume zat cair dari beberapa alat ukur diberikan pada Tabel 2. Gelas/silinder ukur menawarkan kepraktisan dalam pengukuran namun sensitivitasnya sangat bergantung pada ukuran silinder [4]. Sementara sensor *ultrasound* memberikan sensitivitas ukur sebagai tegangan respon sensor terhadap jarak linear sebesar 13,6 mV/cm [26]. Penggunaan sensor metamaterial sebagai sensor memiliki sensitivitas ukur yang berbeda untuk zat cair berbeda sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Gelas ukur dan sensor *ultrasound* mengukur volume zat cair berdasarkan jarak linier dan geometri wadah. Sementara, sensor metamaterial dalam penelitian ini dapat dikembangkan mengukur volume zat cair secara langsung tanpa bergantung geometri wadah karena

pergeseran frekuensi resonan sebanding dengan jumlah zat cair yang berinteraksi dengan sensor.

**Tabel 2.** Perbandingan sensitivitas ukur beberapa alat ukur volume zat cair

Instrumen	Bahan target	Sensitivitas	Ref.
Gelas ukur 100 mL	Zat cair	2 mL/mm	[4]
Gelas ukur 10 mL		0,2 mL/mm	[4]
Sensor <i>ultrasound</i>	Air	13,7 mV/cm	[26]
Sensor meta-material SRR-R	Akuades	-1,3999 MHz/mL	Pene-litian ini
	Air tawar	-2,6833 MHz/mL	
	Etanol	-3,5685 MHz/mL	

**Tabel 3.** FWHM dan *Q-value* sensor metamaterial SRR-R

Sampel	Volume (mL)	FWHM	$f_0$	<i>Q-value</i>
Akuades	5	1,00	527	526,95
	8	1,28	482	376,36
	12	1,28	449	351,58
	14	1,00	438	436,25
	18	1,00	433	431,15
	26	1,00	418	418,00
	30	1,01	410	406,71
	35	1,00	408	408,00
	40	1,01	404	401,59
	44	1,23	403	328,55
Air tawar	5	1,06	528	496,61
	8	1,28	482	376,36
	12	1,05	447	425,19
	14	1,75	442	253,21
	18	1,11	425	381,30
	26	1,06	418	392,75
	30	1,04	411	394,09
	35	1,82	410	225,50
	40	1,04	404	387,20
	44	1,04	403	388,66
Etanol	5	1,21	783	646,52
	8	1,29	721	558,27
	12	1,02	666	652,56
	14	1,01	659	652,35
	18	1,01	644	636,49
	26	1,00	625	624,06
	30	1,01	618	614,56
	35	1,01	615	606,39
	40	1,00	608	607,82
	44	1,00	604	602,85





Tabel 3 menunjukkan karakteristik sensor berupa FWHM dan  $Q$ -value. FWHM adalah lebar penuh setengah maksimum dalam spektrum transmisi amplitudo [15,25].  $Q$ -value adalah ukuran perbesaran pita/band dari spektrum [16]. Dengan demikian,  $Q$ -value yang besar menunjukkan tingginya akurasi pengukuran. FWHM untuk semua zat cair memiliki akurasi sebesar 1,00 – 1,82 MHz dan  $Q$ -value untuk akuades 328,55 – 526,95 MHz, air tawar 225,50 – 496,61 MHz dan etanol 558,27 – 652,56 MHz.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang dan menyimulasi sensor metamaterial SRR-R untuk mengukur perubahan volume zat cair. Akuades, air tawar dan etanol digunakan sebagai sampel pengujian kinerja sensor. Terjadi pergeseran frekuensi resonan yang signifikan untuk semua sampel uji. Pengujian terhadap akuades menghasilkan pergeseran frekuensi resonan dari 403 – 527 MHz, air tawar 403 – 528 MHz dan etanol 603 – 783 MHz. Distribusi medan  $E$  dan  $H$  terjadi pada inklusi logam yang memberikan respon disipasi medan  $E$  maksimum  $18.662 \text{ V.m}^{-1}$  dan medan  $H$  maksimum  $43.771 \text{ A.m}^{-1}$ . Analisis regresi menunjukkan adanya karakteristik linieritas sensor metamaterial SRR-R ketika volume zat cair di atas 8 mL, sementara untuk keseluruhan karakteristik sensor menunjukan *fitting plot* kuadrat. Sensitivitas pengukuran volume akuades adalah  $-1,3999 \text{ MHz/mL}$ , air bersih  $-2,6833 \text{ MHz/mL}$ , dan etanol  $-3,5685 \text{ MHz/mL}$ . Sensor metamaterial SRR-R terbukti memiliki sensitivitas pengukuran yang baik dan akurasi tinggi dalam pengukuran volume zat cair.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemendikbudristek melalui LPPM Universitas Muhammadiyah Riau yang telah mendanai penelitian ini dalam skema penelitian Dosen Pemula (No Kontrak. 56/PRJ/II.3.AU/F/7/2023) dan Lab. Terpadu Fisika, Universitas Muhammadiyah Riau yang telah membantu memfasilitasi pelaksanaan penelitian.

#### Daftar Pustaka

[1] Hoyle, J. D., Ekblad, G., Hover, T., Woodwyk, A., Brandt, R., Fales, B., and Lammers, R. L.,

Dosing Errors Made by Paramedics During Pediatric Patient Simulations After Implementation of a State-Wide Pediatric Drug Dosing Reference, *Prehospital Emergency Care*, **24**(2), pp.204–213, 2020.

- [2] Hoyle, J. D. , Crowe, R. P. , Bentley, M. A. , Beltran, G. , and Fales, W. , Pediatric Prehospital Medication Dosing Errors: A National Survey of Paramedics, *Prehospital Emergency Care*, **21**(2), pp.185–191, 2017.
- [3] Robhani, H. A. and Ro'uf, A. , Perancangan Flowmeter Ultrasonik untuk Mengukur Debit Air Pada Pipa, *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*, **8**(1), pp.83, 2018.
- [4] Susanti and Firdayanti, Buku Ajar Kimia Klinik 1, PT Nasya Expanding Management (NEM), 2021.
- [5] Noer, Z. and Ritinga, S. I., Alat-alat Laboratorium Tingkat Universitas Kategori 1, Guepedia, 2021.
- [6] Anjarsari, L. A., Surtono, A., and Supriyanto, A., Desain dan Realisasi Alat Ukur Massa jenis Zat Cair Berdasarkan Hukum Archimedes Menggunakan Sensor Fotodiode, *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, **3**(1), pp.123–130, 2015.
- [7] Mohindru, P., Development of Liquid Level Measurement Technology: a Review, *Flow Measurement and Instrumentation*, **89**(1), pp.102295, 2023.
- [8] Natividad, J. G. and Mendez, J. M., Flood Monitoring and Early Warning System Using Ultrasonic Sensor, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **325**(1), 2018.
- [9] Shalaev, W. and Cai, V., *Optical Metamaterial*, Springer, 2009.
- [10] Abdulkarim, Y. I. , Deng, L. , Alt, O. , Ünal, E. , and Karaaslan, M. , Metamaterial Absorber Sensor Design by Incorporating Swastika Shaped Resonator to Determination of the Liquid Chemicals Depending on Electrical Characteristics, *Physica E-Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **114**(1), pp.1–10, 2019.
- [11] Gennarelli, G., Romeo, S., Scarfi, M. R., and Soldovieri, F., a Microwave Resonant Sensor for Concentration Measurements of Liquid Solutions, *IEEE Sensors Journal*, (5), pp.1–8, 2013.
- [12] Karimi, M. A. , Arsalan, M. , and Shamim, A. , Multi-Channel, Microwave-Based, Compact Printed Sensor for Simultaneous and Independent Level Measurement of Eight Liquids, *IEEE Sensors Journal*, **19**(14), pp.5611–5620, 2019.
- [13] A. De Marcellis, E. Palange, M. Janneh, C.



- Rizza, A. C. dan S. M., Optimisation of the Detection Sensitivity of Plasmonic Nanoantenna Based Sensors for Mid-infrared Spectroscopy, *Procedia Engineering*, **120**, pp.1179–1182, 2015.
- [14] Saadeldin, A. S., Hameed, M. F. O. , Elkaramany, E. M. A. , and Obayya, S. S. A. , Highly Sensitive Terahertz Metamaterial Sensor, *IEEE Sensors Journal*, **19**(18), pp.7993–7999, 2019.
- [15] Yang, J. and Lin, Y. S., Design of Tunable Terahertz Metamaterial Sensor with Single- and Dual-resonance Characteristic, *Nanomaterials*, **11**2021.
- [16] Li, F., He, K., Tang, T., Mao, Y., Wang, R., Li, C., and Shen, J., The Terahertz Metamaterials for Sensitive Biosensors in the Detection of Ethanol Solutions, *Optics Communications*, **475**(1), pp.1–6, 2020.
- [17] Oon, C. S., Ateeq, M. , Shaw, A., Al-Shamma’A, A., Kazi, S. N., and Badarudin, A., Experimental Study on a Feasibility of Using Electromagnetic Wave Cylindrical Cavity Sensor to Monitor the Percentage of Water Fraction in a Two Phase System, *Sensors and Actuators, A: Physical*, pp.140–149, 2016.
- [18] Pandit, N., Jaiswal, R. K., and Pathak, N. P., Plasmonic Metamaterial-Based Label-Free Microfluidic Microwave Sensor for Aqueous Biological Applications, *IEEE Sensors Journal*, **20**(18), pp.10582–10590, 2020.
- [19] Cai, J., Zhou, Y. J., and Yang, X. M., A Metamaterials-loaded Quarter Mode SIW Microfluidic Sensor for Microliter Liquid Characterization, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **33**(3), pp.261–271, 2019.
- [20] Govind, G. and Akhtar, M. J., Metamaterial-Inspired Microwave Microfluidic Sensor for Glucose Monitoring in Aqueous Solutions, *IEEE Sensors Journal*, **19**(24), pp.11900–11907, 2019.
- [21] Syahputra, R. F., Soerbakti, Y., Syech, R., Taer, E., and Saktioto., Effect of Stripline Number on Resonant Frequency of Hexagonal Split Ring Resonator Metamaterial, *Jurnal Aceh Physics Society*, **13**(1), pp.104–116, 2020.
- [22] Aristov, A. I., Manousidaki, M., Danilov, A. , Terzaki, K., Fotakis, C., Farsari, M., and Kabashin, A. V., 3D plasmonic crystal Metamaterials for Ultra-sensitive Biosensing, *Scientific Reports*, pp.1–8, 2016.
- [23] Sreekanth, K. V., ElKabbash, M., Alapan, Y., Ilker, E. I., Hinczewski, M. , Gurkan, U. A., and Strangi, G., Hyperbolic Metamaterials-based Plasmonic Biosensor for Fluid Biopsy with Single Molecule Sensitivity, *EPJ Applied Metamaterials*, pp.1–8, 2017.
- [24] Juan, C. G., Bronchalo, E., Potelon, B., Quendo, C., Ávila-Navarro, E., and Sabater-Navarro, J. M., Concentration Measurement of Microliter-Volume Water-Glucose Solutions Using Q Factor of Microwave Sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **68**(7), pp.2621–2634, 2019.
- [25] Zhang, R. , Chen, Q. , Liu, K. , Chen, Z. , Li, K. , Zhang, X. , Xu, J. , and Pickwell-Macpherson, E. , Terahertz Microfluidic Metamaterial Biosensor for Sensitive Detection of Small-Volume Liquid Samples, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, **9**(2), pp.209–214, 2019.
- [26] Subekti, A., Cahyono, B.E., Misto, and Nugroho, A.T., Static characteristics analysis of Ultrasonic Sensor HC-SR 04 and its Application to Water Level Monitoring Based on Arduino Uno, *AIP Conference Proceedings*, **2663**, 060006, 2022.

