

Optimasi Filter Gelombang Mikro Berbasis Metamaterial *Split Ring Resonators*

Disti Nabila Suci*, Muldarisnur

Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas

Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 21 Januari 2021
Direvisi: 07 Februari 2021
Diterima: 08 Februari 2021

Kata kunci:

bandwidth
insertion loss
metamaterial
optimasi
split ring resonators

Keywords:

bandwidth
insertion loss
metamaterials
optimization
split ring resonators

Penulis Korespondensi:

Disti Nabila Suci
Email: distinabilasuci@gmail.com

ABSTRAK

Optimasi geometri metamaterial *Split Ring Resonators* (SRR) dilakukan dengan bervariasi ukuran geometrinya sehingga dapat bekerja pada rentang frekuensi gelombang mikro dan dapat diaplikasikan sebagai filter gelombang mikro. Variasi dilakukan terhadap ukuran jari-jari SRR (r), lebar celah SRR (g), dan lebar cincin SRR (c). Optimasi bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi geometri metamaterial SRR terhadap *bandwidth* frekuensi, *insertion loss* dan frekuensi resonansi dari filter yang dihasilkan. Perancangan geometri SRR dan variasi geometri dilakukan secara numerik menggunakan *software Comsol Multiphysics*. Data frekuensi dan *insertion loss* yang didapatkan dari *Comsol Multiphysics* diolah menggunakan *Matlab* sehingga didapatkan grafik pengaruh variasi geometri metamaterial SRR terhadap *bandwidth* frekuensi, *insertion loss* dan frekuensi resonansi filter yang dihasilkan. Hasil yang didapatkan, semakin kecil lebar cincin maka semakin besar lebar *bandwidth* yang dihasilkan. Lebar celah cincin SRR tidak mempengaruhi *bandwidth* frekuensi. Semakin kecil jari-jari, lebar celah dan jarak pisah cincin luar dan cincin dalam maka *insertion loss* yang dihasilkan semakin kecil. Frekuensi resonansi yang didapatkan secara numerik lebih besar daripada frekuensi dengan perhitungan analitik. Perbedaan ini disebabkan karena posisi geometri SRR secara analitik berbeda dengan numerik. Hasil optimal yang didapatkan dari optimasi ini adalah geometri dengan $r = 6,5$ mm, $l = 0,75$ mm, $g = 2$ mm yang memiliki *bandwidth* 690 MHz frekuensi dan *insertion loss* filter -4 dB.

Optimization of the geometry of the Split Ring Resonators (SRR) metamaterial is done by varying the size of the geometry so that it can work in the microwave frequency range and can be applied as a microwave filter. Variations were made on the size of the SRR radius (r), the SRR slit width (g), and the SRR ring width (c). Optimization aims to determine how the effect of geometric variations of the SRR metamaterial on the frequency bandwidth, insertion loss and resonance frequency of the resulting filter. The design of SRR geometry and geometric variation was done numerically using Comsol Multiphysics software. The frequency and insertion loss data obtained from Comsol Multiphysics were processed using Matlab to obtain a graph of the effect of geometric variations of the SRR metamaterial on the frequency bandwidth, insertion loss and the resulting filter resonance frequency. The results obtained, the smaller the ring width, the greater the width of the resulting bandwidth. The SRR ring gap width does not affect the frequency bandwidth. The smaller the radius, the gap width and separation distance between the outer and inner rings, the smaller the resulting insertion loss. The resonant frequency obtained numerically is greater than the frequency by analytic calculations. This difference is due to the geometrical position of the SRR which is analytically different from that of the numeric. The optimal results obtained from this optimization are geometry with $r = 6.5$ mm, $l = 0.75$ mm, $g = 2$ mm which has a bandwidth of 690 MHz frequency and insertion loss filter -4 dB.

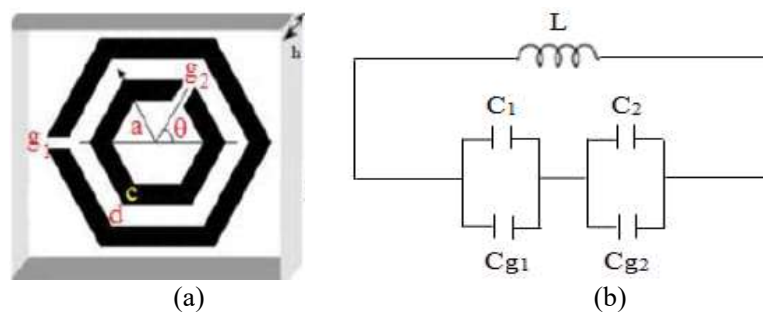
Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Filter sangat diperlukan dalam sistem telekomunikasi untuk memisahkan sinyal informasi dan noise. Berkembangnya penggunaan sinyal pada frekuensi gelombang seperti pada antenna radar, memberikan tantangan untuk dikembangkannya filter gelombang mikro. Filter gelombang mikro yang sudah ada saat ini masih memiliki performa yang rendah yaitu; *bandwidth* frekuensi yang masih kecil yaitu; 500 GHz dan nilai *insertion loss* yang cukup besar yaitu; -0,43 dB. Untuk itu perlu dikembangkannya filter gelombang mikro dengan performa tinggi, lebih kecil, lebih ringan serta lebih murah. Kemudian penemuan metamaterial yang memiliki sifat unik yaitu dapat direkayasa sesuai kebutuhan telah mendorong berkembangnya penelitian tentang penggunaan metamaterial untuk berbagai aplikasi seperti pada sistem telekomunikasi. Metamaterial jenis *split ring resonators* dapat diaplikasikan pada sistem telekomunikasi seperti pada filter. *Split Ring resonator* memiliki geometri sel satuan yang bertindak sebagai sirkuit LC sehingga dapat digunakan sebagai filter. Penggunaan *split ring resonators* akan meningkatkan *bandwidth* filter.

Penelitian yang dilakukan oleh (Rinditayoga dan Dian, 2015) dengan merancang filter bandpass dari metamaterial SRR persegi terbuka menghasilkan *bandwidth* 600 MHz dan *insertion loss* -0,53 dB. Penelitian juga dilakukan oleh (Fathnan, 2015) yang merancang filter metamaterial persegi panjang. Hasil penelitian menunjukkan *bandwidth* yang lebar dihasilkan dari geometri metamaterial SRR dengan panjang horisontal yang lebih besar yaitu; 15,6 mm. (Kurnia dkk., 2017) merancang filter metamaterial SRR heksagonal yang menunjukkan kinerja filter lebih ditentukan oleh ukuran geometri metamaterial SRR bukan dari material SRR yang digunakan. Pada penelitian ini dirancang filter metamaterial SRR heksagonal untuk aplikasi filter gelombang mikro yang bekerja pada rentang frekuensi *X-Band* (8 – 12 GHz). Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan filter gelombang mikro dengan *bandwidth* yang lebar, *insertion loss* yang kecil dan untuk melihat pengaruh variasi geometri yang dilakukan terhadap *bandwidth*, *insertion loss* dan frekuensi resonansi yang dihasilkan. Filter gelombang mikro berbasis metamaterial SRR ini dapat dikembangkan lebih lanjut dan diaplikasikan sebagai filter pada antenna RADAR.

Metamaterial adalah struktur periodik yang tersusun atas sel atau elemen satuan yang dapat memperlihatkan sifat optik tertentu yang tidak ditemukan di alam. Metamaterial memiliki kemampuan memanipulasi gelombang elektromagnetik seperti menghambat, memandu, menyerap, melokalisasi, menguatkan dan membelokkan gelombang. Metamaterial *split ring resonator* (SRR) adalah metamaterial dengan struktur geometri berupa cincin terpisah. Metamaterial SRR secara keseluruhan bertindak sebagai sirkuit LC (induktor-kapasitor) dalam skala mikro sehingga dapat digunakan sebagai filter gelombang mikro. Bentuk geometri filter metamaterial SRR heksagonal beserta rangkaian filternya ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 (a) Bentuk geometri dan (b) Rangkaian setara filter metamaterial SRR heksagonal (Sumber: Kurnia dkk., 2017)

Pada Gambar 1a celah g_1 , g_2 dan c merupakan kapasitor dan jarak antara cincin luar dan cincin dalam (d) merupakan induktor. Kapasitansi efektif, induktansi efektif dan frekuensi resonansinya adalah sebagai berikut:

$$C_{eff} = \left[\frac{\left(N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) + \beta \right)^2 - \left(\frac{\Delta}{a}\right)^2}{2\left(N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) + \beta \right)} \right] \tag{1}$$

$$L_{eff} = 0,00508 \left(2,303 \log_{10} \frac{4l}{c} - 2,636 \right) \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{(a_{eq} L_{net} C_{net})}} \quad (3)$$

Dimana:

$$a_{eq} = 2a \sin \left\{ \frac{\pi}{N} \right\} - \frac{g}{N} \quad (4)$$

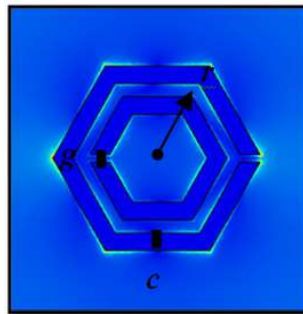
$$l = 2aN \sin \left\{ \frac{\pi}{N} \right\} \quad (5)$$

$$\Delta = a \sin \left\{ \frac{\pi}{N} \right\} (2m + 1) - a \cos \left\{ \frac{\pi}{N} \right\} \tan \left\{ \frac{\pi}{N} - \varphi \right\} \quad (6)$$

(Sumber: Singh dan Sharma, 2014)

II. METODE

Penelitian yang dilakukan bersifat numerik dengan membuat simulasi serta perhitungan *bandwidth* frekuensi dan *insertion loss* filter secara komputasi. Rancangan filter SRR dibuat untuk menghasilkan respon frekuensi pada rentang frekuensi *X-Band* yaitu, 8 GHz – 12 GHz. Pada perancangan awal parameter geometri yang digunakan adalah $r = 5$ mm, $g = 1$ mm, $c = 2$ mm. Bentuk geometri awal ini akan divariasikan secara bertahap dimulai dari variasi ukuran jari-jari, lebar celah, dan lebar cincin SRR. Geometri dengan parameter yang divariasikan ditunjukkan pada Gambar 2.



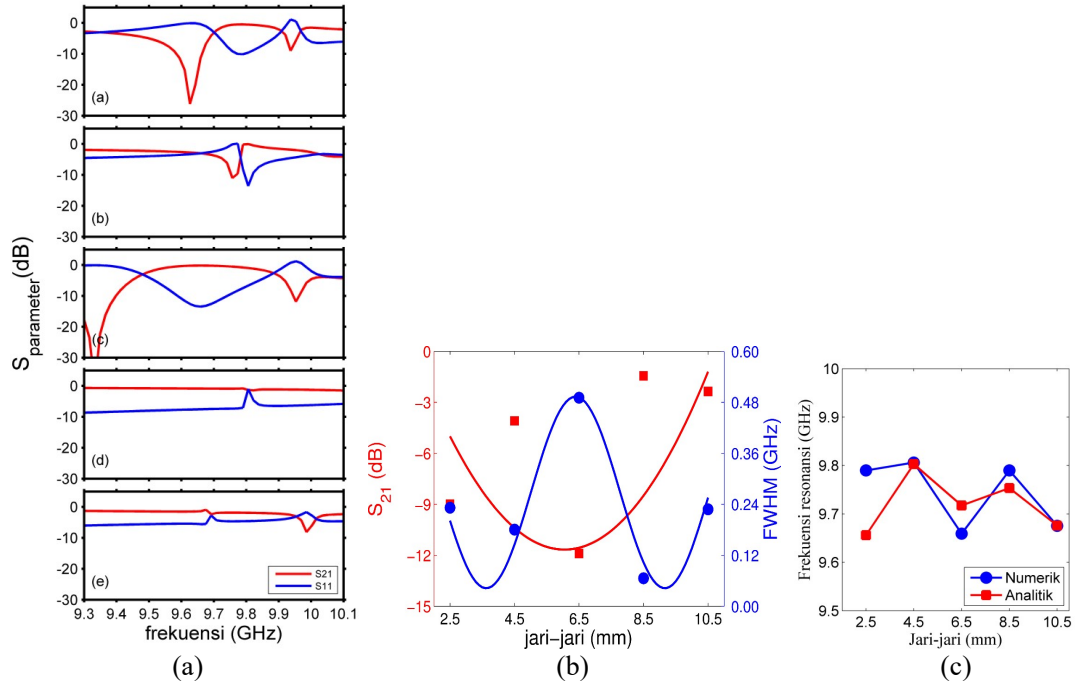
Gambar 2 Geometri SRR dan parameter yang divariasikan

Jari-jari divariasikan pada rentang 2,5 mm – 10,5 mm. Lebar celah divariasikan pada rentang 0,5 mm – 1,5 mm, lebar cincin divariasikan pada rentang 2 mm – 3 mm, tebal cincin divariasikan pada rentang 0,375 mm – 1 mm, jarak pisah cincin luar dan cincin dalam divariasikan pada rentang 1 mm – 1,5 mm. Pada tahap variasi geometri ini dihasilkan data frekuensi terhadap parameter hamburan (S_{11} dan S_{21}) untuk setiap variasi geometri yang dilakukan. Data tersebut kemudian diolah menggunakan *Microsoft Excel* sehingga dihasilkan data variasi ukuran geometri terhadap *insertion loss* (S_{21} minimum), *bandwidth* (FWHM) dan frekuensi resonansi. Perhitungan frekuensi resonansi secara analitik juga dilakukan dengan menggunakan Persamaan (3) untuk setiap variasi yang dilakukan. Data frekuensi resonansi secara analitik ini dibandingkan dengan data frekuensi secara numerik yang didapatkan dari perhitungan menggunakan *Comsol Multiphysics*. Pengukuran data *insertion loss* dan *bandwidth* secara analitik tidak dapat dilakukan karena belum ada rumus analitiknya. Hasil pengolahan data yang didapatkan pada tahap pengolahan data diplot untuk mendapatkan grafik frekuensi terhadap parameter hamburan untuk variasi jari-jari, lebar celah, lebar cincin, tebal cincin, jarak pisah cincin luar dan cincin dalam, dan data posisi celah cincin luar dan cincin dalam. Pada tahap ini juga diplot data variasi geometri terhadap *insertion loss* (S_{21} minimum) dan *bandwidth* (FWHM) dan data variasi geometri terhadap frekuensi resonansi secara analitik dan numerik. Pada tahap akhir dilakukan analisa pengaruh variasi ukuran geometri jari-jari, lebar celah, dan lebar cincin terhadap *bandwidth*, *insertion loss* dan frekuensi resonansi yang dihasilkan.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Variasi Jari-jari SRR (r)

Pada variasi jari-jari dihasilkan grafik frekuensi terhadap parameter hamburan (S_{11} dan S_{21}), grafik variasi jari-jari terhadap *insertion loss* dan *bandwidth* dan grafik variasi jari-jari terhadap frekuensi resonansi secara analitik dan numerik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Grafik yang dihasilkan pada variasi jari-jari (a) frekuensi terhadap parameter hamburan, (b) jari-jari terhadap S_{21} minimum dan FWHM, dan (c) jari-jari terhadap frekuensi resonansi analitik dan numerik

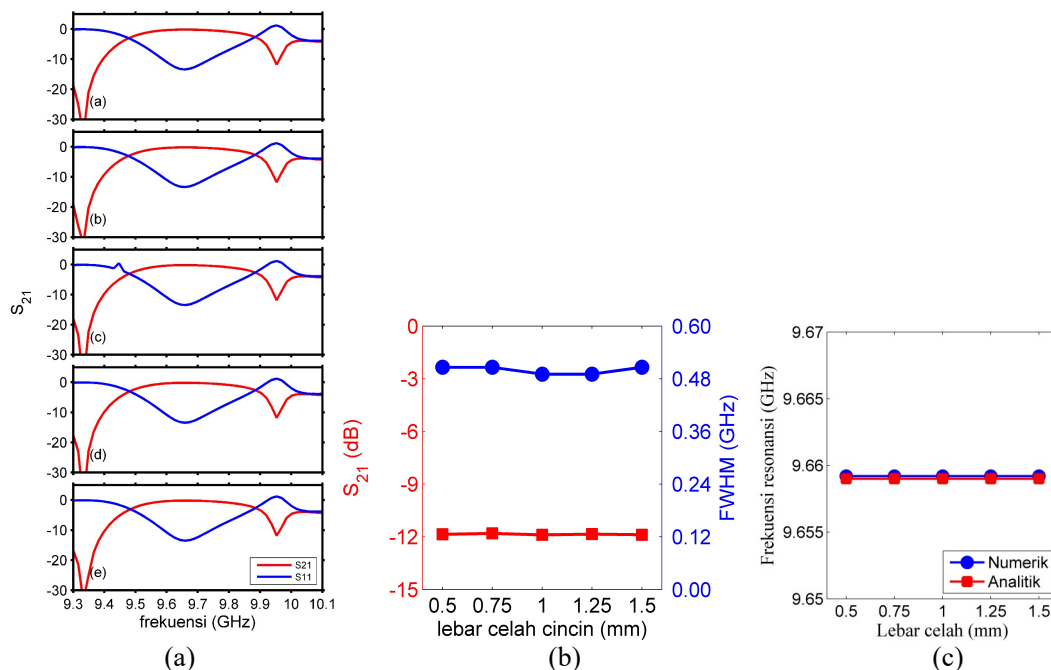
Pada Gambar 3a grafik frekuensi terhadap parameter hamburan yang dihasilkan menunjukkan jari-jari sangat mempengaruhi respon frekuensi SRR baik frekuensi resonansi maupun intensitas parameter hamburannya (S_{11} dan S_{21}). Spektrum resonansi dengan *bandwidth* paling lebar dihasilkan dari jari-jari SRR 6,5 mm dengan frekuensi kerja dari 9,48 GHz sampai 9,88 GHz. Pergeseran puncak resonansi dapat dijelaskan sebagai akibat berubahnya kapasitansi dan induktansi efektif SRR.

Pada Gambar 3b *insertion loss* dan *bandwidth* berubah secara tidak monoton terhadap jari-jari SRR. Minimum S_{21} cenderung berkurang ketika jari-jari diperbesar hingga 5 mm sebelum bertambah pada jari-jari di atas 5 mm. Sebaliknya FWHM, cenderung naik pada jari-jari hingga 5 mm sebelum berkurang kembali ketika jari-jari diperbesar. Secara teori, semakin besar jari-jari SRR maka kapasitansi dan induktansi SRR menjadi semakin besar sehingga batas frekuensi resonansi menjadi lebih tajam yang mengakibatkan *bandwidth* frekuensi FWHM semakin lebar. Dari variasi ini didapatkan jari-jari SRR optimal sebesar 6,5 mm yang menghasilkan filter dengan *bandwidth* 0,46 GHz atau 460 MHz dan *insertion loss* -11,9 dB.

Gambar 3c memperlihatkan kemiripan tren kebergantungan frekuensi resonansi terhadap jari-jari dengan menggunakan simulasi numerik dan analitik. Tren frekuensi resonansi menunjukkan kecenderungan yang semakin kecil jika jari semakin besar. Tren pergeseran frekuensi resonansi secara numerik sangat bersesuaian dengan frekuensi resonansi yang dihitung secara analitik. Frekuensi resonansi tidak berubah secara monoton terhadap penambahan jari-jari sebagaimana terlihat pada hasil simulasi numerik dan analitik. Hal ini kemungkinan terjadi akibat perbedaan nomor modus resonansi yang tereksitasi pada rentang frekuensi yang ditampilkan. Secara teori, semakin besar jari-jari SRR maka semakin besar kapasitansi dan induktansi SRR sehingga semakin kecil frekuensi resonansi yang dihasilkan.

3.2 Variasi Lebar Celah

Pada variasi lebar celah dihasilkan grafik frekuensi terhadap parameter hamburan, grafik variasi lebar celah terhadap *insertion loss* dan *bandwidth* dan grafik variasi lebar celah terhadap frekuensi resonansi secara analitik dan numerik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



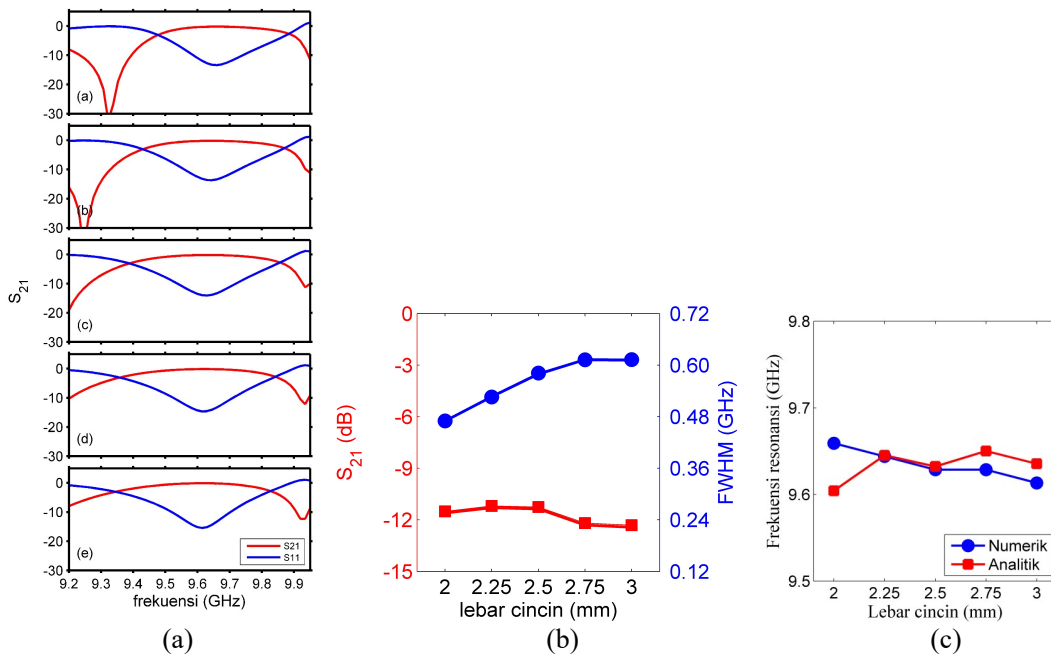
Gambar 4 Grafik yang dihasilkan pada variasi lebar celah
 (a) frekuensi terhadap parameter hamburan, (b) lebar celah terhadap S_{21} minimum dan FWHM, dan (c) lebar celah terhadap frekuensi resonansi analitik dan numerik

Variasi lebar celah cincin dilakukan terhadap geometri SRR yang memiliki respon frekuensi terbaik pada variasi jari-jari sebelumnya yaitu, $r = 6,5$ mm. Dapat dilihat dari Gambar 4a bahwa variasi lebar celah dari 0,50 mm sampai 1,50 mm tidak mengubah *bandwidth* dan S_{21} secara signifikan. Pada Gambar 4b *insertion loss* dan FWHM hampir tidak berubah terhadap pertambahan lebar celah dalam rentang variasi yang dilakukan. *Bandwidth* frekuensi pada lebar celah 0,25 mm, 0,75 mm dan 1,5 mm memiliki nilai yang sama yaitu 0,5061 GHz atau 506,1 MHz dan *insertion loss* -11,804 dB. Dapat dikatakan variasi lebar celah tidak mempengaruhi lebar *bandwidth* dan *insertion loss* secara signifikan.

Pada Gambar 4c respon frekuensi dengan *bandwidth* filter lebih lebar didapatkan dari geometri dengan lebar celah 1,25 mm, 0,75 mm dan 1,5 mm yaitu 506,1 MHz. *Insertion loss* lebih kecil didapatkan dari geometri dengan lebar celah 0,75 mm. Geometri yang dipilih adalah geometri dengan lebar celah 0,75 mm. Grafik kebergantungan frekuensi resonansi terhadap lebar celah secara numerik memperlihatkan kemiripan tren dengan perhitungan analitik. Frekuensi resonansi relatif tidak berubah dengan semakin besarnya lebar celah dalam rentang variasi yang dilakukan. Tren lebar celah terhadap frekuensi resonansi menunjukkan frekuensi resonansi yang tetap ketika lebar celah divariasikan semakin besar maka, dapat dikatakan variasi ukuran lebar celah tidak mempengaruhi frekuensi resonansi yang dihasilkan.

3.3 Variasi Lebar Cincin

Pada variasi lebar cincin dihasilkan grafik frekuensi terhadap parameter hamburan, grafik variasi lebar cincin terhadap *insertion loss* dan *bandwidth* dan grafik variasi lebar celah terhadap frekuensi resonansi secara analitik dan numerik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



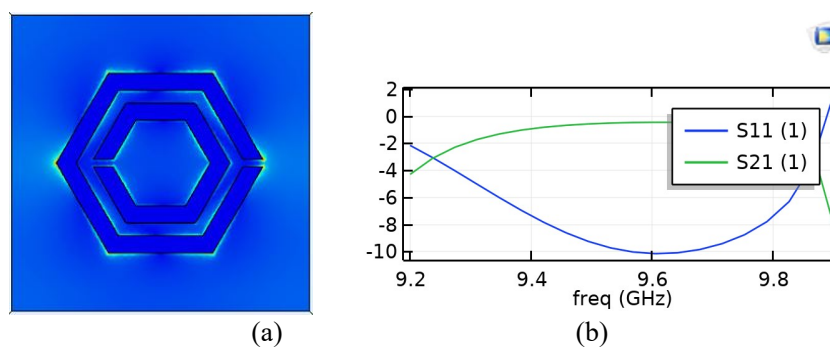
Gambar 5 Grafik variasi lebar cincin

(a) frekuensi terhadap parameter hamburan, (b) lebar cincin terhadap S_{21} minimum dan FWHM, dan (c) lebar cincin terhadap frekuensi resonansi analitik dan numerik

Grafik pada Gambar 5a menunjukkan variasi lebar cincin memberikan pergeseran respon frekuensi dan nilai *insertion loss*. Pada lebar cincin 2 mm sampai 3 mm, didapatkan frekuensi resonansi berturut-turut 9,6582 GHz; 9,6449 GHz; 9,6316 GHz; 9,6184 GHz dan 9,6184 GHz. FWHM terlihat naik secara monoton ketika lebar cincin dinaikkan. Hal ini menandakan makin kuatnya resonansi struktur SRR ketika disinari dengan gelombang mikro. Pada Gambar 5b pertambahan ukuran lebar cincin menghasilkan *bandwidth* yang semakin lebar dan *insertion loss* yang semakin besar. *Insertion loss* yang semakin besar disebabkan karena penyisipan geometri yang semakin besar sehingga rugi-rugi akibat penyisipan yang dihasilkan menjadi semakin besar. Semakin besar geometri yang disisipkan maka semakin besar *insertion loss* yang dihasilkan. Geometri dengan *bandwidth* lebar didapatkan dari lebar cincin 3 mm yaitu; 491 MHz dan geometri dengan *insertion loss* paling kecil didapatkan dari lebar cincin 2.25 mm yaitu; -11.193 dB. Hasil pada grafik pada Gambar 5c memperlihatkan kemiripan tren ketergantungan frekuensi resonansi terhadap lebar cincin dengan menggunakan simulasi numerik dan analitik ketika lebar cincin di atas 2,25 mm. Terdapat perbedaan frekuensi resonansi pada lebar cincin 2 mm.

3.4 Geometri Perfoma Optimal

Geometri optimal memiliki ukuran jari-jari cincin $r = 6,5$ mm, $g = 0,75$ mm, $c = 2$ mm. Bentuk geometri dan spektrum frekuensi filter metamaterial SRR heksagonal dengan perfoma optimal ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Filter perfoma optimal (a) bentuk geometri dan (b) spektrum respon frekuensi

IV. KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan yang didapatkan maka diperoleh kesimpulan; semakin besar lebar cincin maka semakin besar lebar *bandwidth* yang dihasilkan. Lebar celah cincin SRR tidak mempengaruhi *bandwidth* frekuensi. Semakin kecil jari-jari, lebar celah dan jarak pisah cincin luar dan cincin dalam maka *insertion loss* yang dihasilkan semakin kecil. Frekuensi resonansi yang didapatkan secara numerik lebih besar daripada frekuensi dengan perhitungan analitik. Geometri memiliki *bandwidth* 690 MHz dan *insertion loss* -4 dB dan frekuensi resonansi 9,603 GHz dengan frekuensi bawah 9,18 GHz dan frekuensi atas 9,87 GHz.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaydrus, M., 2009, *Saluran Transmisi Telekomunikasi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Astuti, D.W., Muslim dan Pahlevi, T.A., 2019, Substrate Integrate Waveguide Bandpass Filter dengan Complementary Split Ring Resonator, *Jurnal Rekayasa Elektrika*, Vol. 15, No. 1, hal.1-6.
- Cai, W., dan ShalaeV, V.M., 2010, *Optical Metamaterial: Fundamental and Application*, Springer, New York
- Capolino, F., 2009, *Theory and Phenomena of Metamaterials*, CRC Press, U.S.
- Chattopadhyay, 1989, *Dasar Elektronika*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Fathan, A.A., 2015, Efek Kopling pada Filter Metamaterial Coplanar Waveguide Menggunakan SRRs Persegi Panjang Horizontal, *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, Vol. 15, No. 1, hal. 1-5.
- Giancoli, D.C., 2001, *Fisika*, Jilid 2, Edisi Kelima, (diterjemahkan oleh: Yuhilza, H.), Erlangga, Jakarta.
- Hesham, M., dan Abdellatif, S.O., 2019. Compact Bandpass Filter Based on Split Ring Resonator. *Internasional Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, Aswan, Egypt.
- Kurnia, M.F., Saktioto dan Syahputra, R.F., 2017, Metamaterial: Konsep, Proses dan Aplikasi, *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Riau*, Pekanbaru.
- Mack, C., 2017, *Fundamental Principles of Optical Lithography*, John Wiley and Sons, Ltd., England.
- Marquez, R., Martin, F., Sorolla, M., 2007, *Metamaterials with Negative Parameters Theory, Design, and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Mitrayana, 2015, *Teori dan Aplikasi Gelombang Mikro*, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Pain, H.J., 2005, *The Physics of Vibrations and waves*, sixth edition, Imperial College of Science and Technology, London.
- Rinditayoga, N.R. dan Dian, W.A., 2015, Perancangan dan Realisasi Bandpass Filter dengan Metode Open Loop Square Resonator untuk Microwave Link, *Jurnal Teknologi Elektro*, Vol. 7, No. 3, hal. 1-5.
- Salvatore, S., 2015, Optical Metamaterials by Block Copolymer Self-Assembly, *Thesis*, University of Cambridge, Springer-Verlag, Switzerland.
- Shrader, L.R., Dewanto, M., dan Akhyanto, D., 1992, *Komunikasi Elektronika*, edisi 5, PT Gelora Aksara, Jakarta.
- Singh, A., Sharma, S.K., 2014, Calculation of Resonant Frequency of Hexagonal Split Ring Resonators Using ANN, *IJRET*, Vol. 3.
- Susanto, H.A., 2016, Rancang Bangun Metamaterial Absorber Pita Lebar Untuk Aplikasi Radar Cross Section Reduction, *Tesis*, Teknik Elektro ITS, Surabaya.
- Caloz, C., dan Itoh, T., 2008, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Tipler, P., 1991, *Fisika Untuk Sains dan Teknik*, Jilid 1, Edisi Ketiga, Erlangga, Jakarta.
- Tripooetomo dan Supriyanto, T., 2015, Perancangan Wideband Band Pass Filter (Bpf) dengan Menggunakan Mikrostrip 1,78 Ghz-3,38 Ghz, *SETRUM*, Vol. 4, No. 1, hal. 1-6.
- Utami, H. P., 2007, *Mengenal Cahaya dan Optik*, Ganeca Exact, Jakarta.
- Yudhistira, 2015, Teknologi Electrohydrodynamic (EHD) Jet Printing sebagai Alternatif Fabrikasi Terahertz Metamaterial, *Research and Development on Nanotechnology in Indonesia*, Vol. 3, No. 2, hal. 1-23.
- Xiong, H., Hong, J.-S., Tan, M.-T., Li, B., 2013, Compact microstrip antenna with metamaterial for wideband applications. *Turk. J. Electr. Eng. & Comput. Sci.*, Vol. 21, hal. 2233–2238.