

Perancangan dan realisasi BPF *trisection hairpin* dengan kopling silang campuran pada frekuensi tengah 9,47 GHz

Nabila Zahra Salsabila^{1*}, Enceng Sulaeman²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kab. Bandung Barat, Jawa Barat, Indonesia

^{1*}nabila.zahra.tkom419@polban.ac.id, ²enceng.sulaeman@polban.ac.id

ABSTRAK

Bandpass filter (BPF) merupakan alat dalam sistem telekomunikasi yang berfungsi melewatkan sinyal dengan rentang frekuensi yang dibutuhkan dan meredam atau menahan sinyal dengan rentang frekuensi di luarnya. Dalam karya sebelumnya telah dilakukan realisasi *bandpass filter* pada frekuensi X-Band, akan tetapi dalam hasil pengukuran realisasi *bandpass filter* masih terdapat parameter yang belum sesuai dengan spesifikasi. Maka dari itu, pada penelitian ini dirancang dan direalisasikan sebuah *bandpass filter* yang bekerja dalam frekuensi 9200-9700 MHz dengan frekuensi tengah 9470 MHz. menggunakan metode *trisection* berbasis *hairpin resonator* dengan kopling silang campuran. *Bandpass filter* pada penelitian ini telah dirancang dengan *software* AWR Design Environment 2009 dan direalisasikan menggunakan substrat Roger Duroid 5880 dengan spesifikasi *insertion loss passband* kurang dari 2 dB, *return loss passband* lebih dari 14 dB, dan *bandwidth* sebesar 500 MHz. Telah diperoleh hasil realisasi *bandpass filter* dengan menggunakan *casing* pada frekuensi 9290-9680 MHz dengan frekuensi tengah 9485 MHz dan *bandwidth* 390 MHz yang belum memenuhi spesifikasi. *Insertion loss passband* yang diperoleh sebesar 2,5 dB dan *return loss passband* yang diperoleh sebesar 7,9 dB yang mana keduanya pun belum memenuhi spesifikasi. *Bandpass filter* metode *trisection hairpin resonator* dengan kopling silang campuran berhasil dirancang dan direalisasikan dengan menghasilkan dua buah *transmission zeroes*.

Kata kunci: *bandpass filter*, *trisection*, *hairpin*, kopling silang campuran, X-Band

ABSTRACT

A *bandpass filter* is a device in the telecommunications system that designed to pass signals in the required frequency range and attenuate or reject signals outside that frequency range. In the previous work, *bandpass filters* were realized at X-Band frequency. However, the measurement results of past proposed research did not fulfill the specified parameters. Therefore, in this research, a *bandpass filter* was designed and implemented to operate in the frequency range of 9200-9700 MHz with a center frequency of 9470 MHz. The design utilized the *trisection* method based on *hairpin resonators* with mixed cross-coupling. In this research, a *bandpass filter* was designed using AWR Design Environment 2009 software and implemented on a Roger Duroid 5880 substrate with specifications of *passband insertion loss* is less than 2 dB, *passband return loss* more than 14 dB, and *bandwidth* of 500 MHz. The results of the proposed design with a *casing* achieved a frequency range of 9290-9680 MHz with a center frequency of 9485 MHz and a *bandwidth* of 390 MHz which did not fulfill the specifications. The *passband insertion loss* obtained was 2.5 dB and the *passband return loss* obtained was 7.9 dB, both of which also did not fulfill the parameters of specification. *Bandpass filter* with *hairpin resonator* and mixed cross-coupling was successfully designed and realized with two *transmission zeroes*.

Keywords: *bandpass filter*, *trisection*, *hairpin*, mixed cross-coupling, X-Band

1. PENDAHULUAN

Seiring berjalannya waktu, teknologi telekomunikasi berkembang dengan sangat pesat dan salah satunya adalah filter. Filter merupakan alat yang berfungsi untuk memproses dengan meredam, meneruskan dan menyaring sinyal yang dibutuhkan dan atau tidak memproses dengan menahan, meloloskan atau membuang sinyal yang tidak dibutuhkan [1]. Salah satu jenis filter adalah *bandpass filter* (BPF) yang berfungsi melewatkan sinyal dengan rentang frekuensi yang dibutuhkan dan menahan sinyal dengan rentang frekuensi di luarnya. *Bandpass filter* dapat menjadi salah satu

komponen penting penyusun radar, elektronika medis, sistem komunikasi, sistem keamanan, dan lainnya.

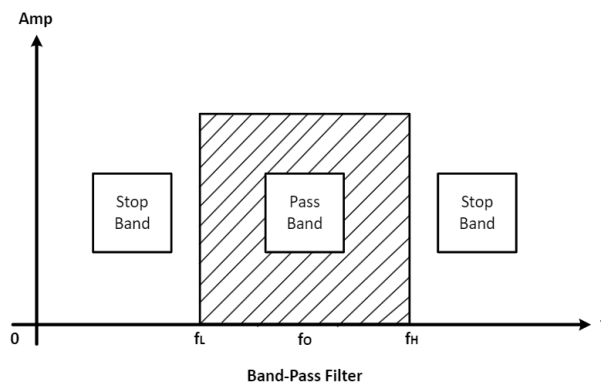
Trisection adalah metode BPF menggunakan tiga buah resonator dengan kopling silang untuk menghasilkan *transmission zeroes* (TZ) pada satu sisi di luar *passband* [2]. Dalam sintesisnya untuk menghasilkan *transmission zeroes* diperlukan sebuah elemen yang tidak berubah terhadap frekuensi, FIR *Frequency Independent Reactance*. Jika kopling silang berupa kopling elektrik maka *transmission zeroes* akan muncul pada sebelah atas *passband*, sebaliknya jika kopling silang berupa kopling magnetik maka *transmission zeroes* berada pada sebelah bawah *passband*. Untuk menghasilkan dua buah *transmission zeroes*, pada bagian atas dan bawah *passband* diperlukan kopling silang campuran [3].

Dalam karya sebelumnya telah direalisasikan *band pass filter* dengan metode yang berbeda-beda pada frekuensi X-Band. Akan tetapi, terdapat parameter yang belum sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan yaitu mengalami pergeseran pada frekuensi tengah dan meningkatnya nilai *insertion loss* menjadi ≥ 2 dB [4], [5]. Telah direalisasikan pula *bandpass filter* menggunakan metoda *cross-coupled trisection* dengan satu jenis kopling [6]. Pada penelitian ini dirancang *bandpass filter* dengan kopling silang campuran untuk menghasilkan dua buah TZ pada sebelah atas dan bawah *passband*. Metode yang digunakan adalah modifikasi hairpin *bandpass filter* dengan menambahkan kopling silang campuran diantara resonator 1 dan 3 sehingga membentuk *trisection bandpass filter* pada pita frekuensi X-Band dengan rentang frekuensi kerja 9,2 – 9,7 GHz.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Perancangan BPF

Filter merupakan alat yang berfungsi untuk memproses dengan meredam, meneruskan dan menyaring sinyal yang dibutuhkan dan atau tidak memproses dengan menahan, meloloskan atau membuang sinyal yang tidak dibutuhkan [1]. *Bandpass filter* merupakan salah satu jenis filter yang berfungsi melewatkan frekuensi tertentu (frekuensi *cut-off* bawah sampai frekuensi *cut-off* atas) dan menahan frekuensi di luar rentang tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Bandpass filter* [7]

2.2 Mikrostrip

Mikrostrip terbuat dari konduktor yang terdiri dari strip dan *ground* yang diantaranya berupa substrat dengan konstanta dielektrik (ϵ_r). Persamaan untuk memperoleh konstanta dielektrik efektif yang merupakan nilai konstanta dielektrik untuk resonator pada mikrostrip adalah sebagai berikut [8]:

$$\epsilon_{eff} = \begin{cases} \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\left[1 + \frac{12d}{W} \right]^{-1/2} + 0,04 \left[1 - \frac{W}{d} \right]^2 \right) & W/d \leq 1 \\ \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12d}{W} \right]^{-1/2} & W/d > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Selanjutnya, berikut adalah nilai dari impedansi karakteristik yang merupakan nilai impedansi dari saluran mikrostrip:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi/\sqrt{\epsilon_e}}{W/d + 1,393 + 0,667 \ln(W/d + 1,444)} & W/d > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Apabila impedansi saluran dan konstanta dielektrik efektif diketahui dalam perancangan, maka penentuan lebar strip dapat menggunakan rumus berikut:

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right] & W/d > 2 \end{cases} \quad (3)$$

Dengan:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (4)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

Kemudian untuk memperoleh panjang resonator diperoleh dari setengah dari panjang gelombang. Maka rumus panjang resonator diketahui:

$$L = \frac{\lambda_g}{2} \quad (6)$$

dengan:

$$\lambda_g = \frac{c}{f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (7)$$

Frekuensi tengah dari filter dapat diketahui dengan rumus berikut:

$$f_0 = \sqrt{f_1 \times f_2} \quad (8)$$

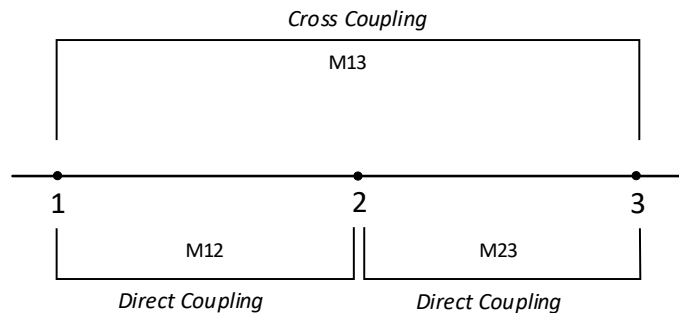
2.3 Trisection

Trisection merupakan salah satu metode dalam perancangan filter yang menggunakan orde 3. Metode *trisection* disebut demikian karena menggunakan tiga resonator (*triplets*) untuk mencapai respons filter yang diinginkan pada perancangan. Dalam hal ini, orde menggambarkan jumlah resonator yang aktif dalam perancangan filter. Resonator-resonator ini ditempatkan secara berurutan dalam jalur transmisi. Orde 3 merupakan orde yang cukup rendah dan menghasilkan dimensi filter yang cukup kecil.

Metode *trisection* menggunakan kopling silang untuk menghasilkan *transmission zeroes* (TZ) pada satu sisi di luar *passband* [2]. Apabila kopling silang berupa kopling elektrik maka *transmission zeroes* akan muncul pada sebelah atas *passband*, sebaliknya jika kopling silang berupa kopling magnetik maka *transmission zeroes* berada pada sebelah bawah *passband*. Maka dari itu, untuk menghasilkan dua buah *transmission zeroes* di atas dan di bawah *passband* dibutuhkan kopling silang campuran [3].

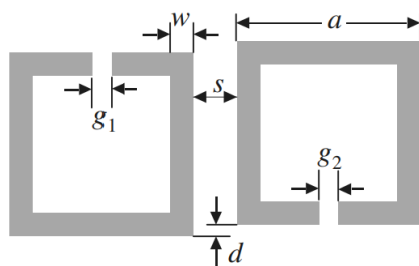
2.4 Kopling Silang Campuran

Salah satu metode perancangan resonator dalam filter adalah kopling silang. Kopling silang terjadi ketika sebuah resonator didekatkan dengan resonator lain yang tidak berurutan seperti pada Gambar 2. Metode ini dapat mempertajam hasil respons frekuensi dari sebuah filter. Kopling silang menghasilkan respons yang selektif dengan respons frekuensi filter jenis quasielliptic yang memiliki *transmission zero* [9].

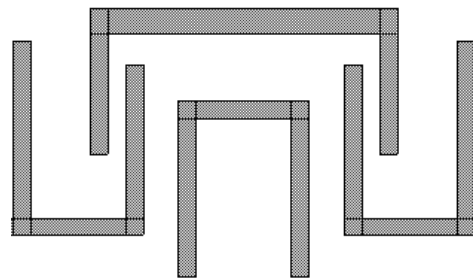


Gambar 2. *Trisection* dengan kopling silang [9]

Kopling campuran merupakan superposisi dari kopling magnetik dan elektrik seperti. Gambar 3 menunjukkan bahwa kopling campuran terjadi ketika sisi diantara tengah dan ujung resonator $\frac{\lambda}{2}$ dengan ujung terbuka didekatkan dengan sisi diantara tengah dan ujung resonator $\frac{\lambda}{2}$ dengan ujung terbuka lainnya, dimana akan terbentuk medan listrik dan medan magnet. *Trisection* dengan kopling silang campuran ditunjukkan seperti pada Gambar 4.



Gambar 3. Kopling campuran [2]



Gambar 4. *Trisection* dengan kopling silang campuran

2.5 Spesifikasi Perancangan

Spesifikasi *bandpass filter trisection* berbasis *hairpin* dengan kopling silang campuran yang diharapkan terlampir pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi filter

Parameter	Spesifikasi
Frekuensi Kerja	9200 – 9700 MHz
Frekuensi Tengah	9470 MHz
Bandwidth 14 dB	500 MHz
Insertion Loss passband	≤ 2 dB
Return Loss Passband	≥ 14 dB

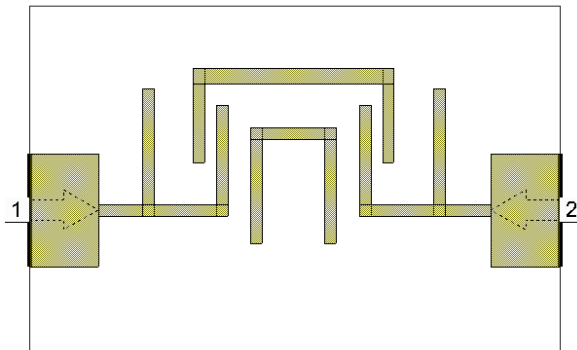
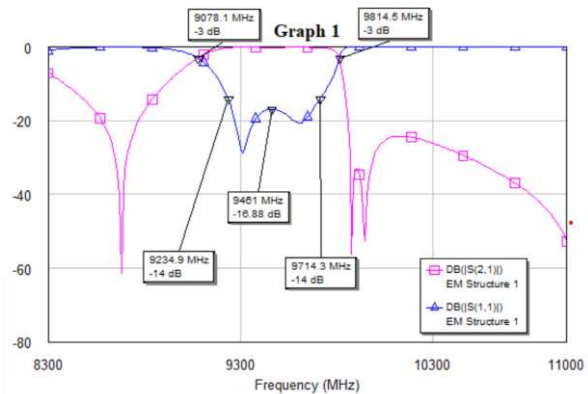
Material substrat yang digunakan adalah Rogers Duroid 5880 dengan spesifikasi terlampir pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Spesifikasi material

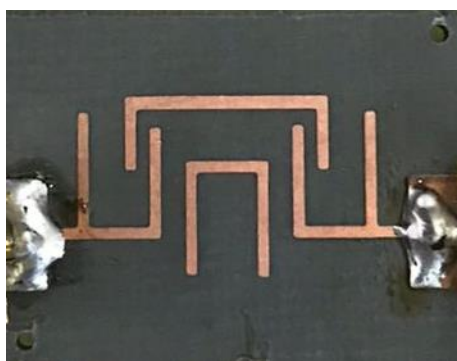
Parameter	Spesifikasi
Konstanta Dielektrik (ϵ_r)	2,2
<i>Dielectric Loss Tangen</i> ($\tan\delta$)	0,0004 – 0,0009
Ketebalan Substrat	1,575 mm

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

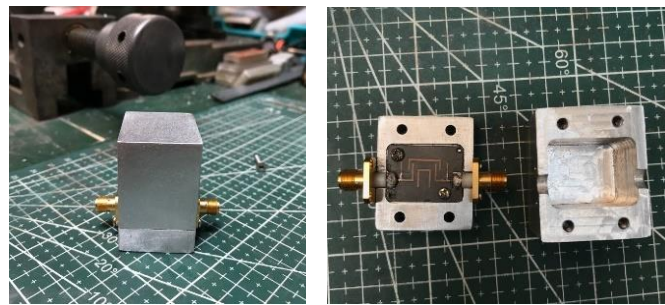
Setelah dilakukan simulasi dan optimasi didapatkan hasil akhir dari respons frekuensi yakni seperti pada Gambar 5 berikut:

**Gambar 5. Simulasi bandpass filter****Gambar 6. Respons frekuensi simulasi bandpass filter**

Dari Gambar 6 dapat terlihat adanya dua buah *transmission zeroes* pada sisi atas dan bawah *passband* dengan respons frekuensi quasielliptic yang mana sudah sesuai dengan yang diinginkan. Dari hasil simulasi dan optimasi *bandpass filter* didapatkan hasil maksimal pada respons frekuensi yakni dengan frekuensi kerja dari 9234 – 9714 MHz dengan *bandwidth* 480 MHz. Setelah melakukan proses simulasi dan memiliki hasil yang mendekati spesifikasi, dilanjutkan dengan melakukan realisasi. Proses realisasi dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu pencetakan PCB, pemasangan konektor, dan pembuatan *casing*. Pencetakan dilakukan pada substrat PCB Rogers Duroid 5880 dengan hasil seperti pada Gambar 7.

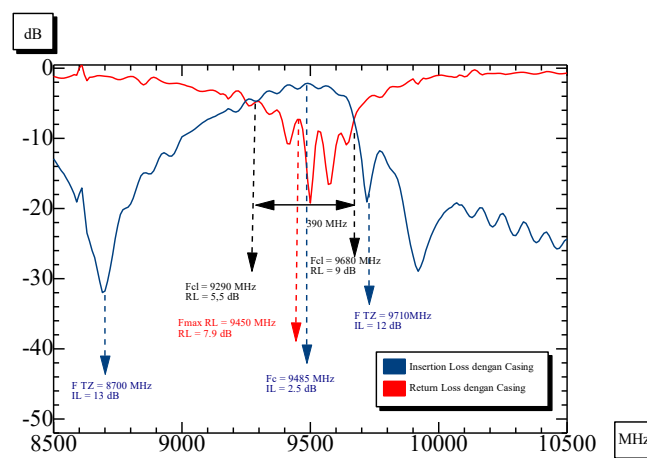
**Gambar 7. Hasil pencetakan PCB bandpass filter**

Proses pembuatan *casing* dilakukan setelah proses pencetakan PCB selesai. Bahan yang digunakan dalam pembuatan *casing* adalah aluminium dural. Pembuatan *casing* bertujuan agar udara luar tidak mempengaruhi respons frekuensi dan sesuai dengan simulasi pada AWR Design Environment 2009 dimana layer udara yang berada di atas PCB diatur sebesar 2 cm.



Gambar 8. Casing BPF bagian luar dan dalam

Gambar 8 merupakan hasil PCB setelah menggunakan *casing*. Setelah dilakukan pencetakan hingga pemasangan casing, *bandpass filter* diukur menggunakan *network analyzer* dan menghasilkan respons frekuensi sebagai berikut:



Gambar 9. Respons frekuensi realisasi *bandpass filter*

Pada respons frekuensi Gambar 9 dapat terlihat adanya dua buah *transmission zeroes* dengan respons frekuensi quasielliptic pada sisi atas dan bawah *passband* yang mana sudah sesuai dengan yang diinginkan. Dari hasil realisasi *bandpass filter* didapatkan nilai frekuensi kerja dari 9290 – 9680 MHz dengan *bandwidth* 390 MHz. Selanjutnya, data pada Tabel 3 di bawah ini merupakan hasil pengukuran parameter pada simulasi dan realisasi:

Tabel 3. Data Parameter Hasil Simulasi dan Realisasi

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Realisasi
Frekuensi <i>cut-off</i> bawah	9200 MHz	9234 MHz	9290 MHz (5,5 dB)
Frekuensi <i>cut-off</i> atas	9700 MHz	9714 MHz	9680 MHz (5,5 dB)
<i>Bandwidth</i> 14 dB	500 MHz	480 MHz	390 MHz (5,5 dB)
Frekuensi tengah	9470 MHz	9471 MHz	9485 MHz (5,5 dB)
<i>Return loss</i> maksimum <i>passband</i>	≥ 14 dB	16,88 dB	7,9 dB
<i>Insertion loss</i> <i>passband</i>	≤ 2 dB	0,08 dB	2,5 dB

Dari data yang telah diambil dapat dianalisis bahwa hasil simulasi memiliki beberapa perbedaan dengan spesifikasi. Frekuensi *cut-off* atas dan bawah yang diperoleh pada simulasi adalah sebesar 9234 MHz dan 9714 MHz yang mana keduanya belum memenuhi spesifikasi parameter karena masing-masing bergeser sebesar 34 MHz dan 14 MHz. Frekuensi tengah *passband insertion loss* pada simulasi diperoleh sebesar 9471 MHz yang mana frekuensi bergeser sebesar 1 MHz. *Bandwidth* yang diperoleh menyempit 20 MHz dari spesifikasi dengan hasil pada simulasi sebesar 480 MHz. Nilai *return loss* maksimum *passband* yang diperoleh sebesar 16,88 dB dan telah memenuhi spesifikasi yaitu ≥ 14 dB. Nilai *insertion loss* *passband* yang diperoleh telah memenuhi spesifikasi yaitu ≤ 2 dB sebesar 0,08 dB.

Selanjutnya dilakukan pengukuran realisasi dengan menggunakan *network analyzer* dan dihasilkan nilai-nilai pada setiap parameter seperti yaitu frekuensi *cut-off* 5.5 dB dengan frekuensi *cut-off* bawah yang diperoleh sebesar 9290 MHz dan frekuensi *cut off* atas sebesar 9680 MHz. Hasil tersebut belum sesuai dengan spesifikasi parameter yang diinginkan karena frekuensi *cut-off* bawah bergeser sebesar 90 MHz dan frekuensi *cut-off* atas bergeser sebesar 20 MHz. Pergeseran frekuensi *cut-off* menyebabkan *bandwidth* yang dihasilkan mengalami penyempitan sebesar 110 MHz sehingga nilai *bandwidth* menjadi sebesar 390 MHz. Dalam pengukuran ini didapat *return loss* dan *insertion loss* yang belum sesuai dengan spesifikasi awal yaitu masing-masing sebesar 7.9 dB dan 2.5 dB, dimana spesifikasi yang diinginkan untuk *return loss* adalah ≥ 14 dB dan *insertion loss* ≤ 2 dB. Frekuensi tengah yang diperoleh sebesar 9485 MHz yang mana bergeser 15 MHz dan belum memenuhi spesifikasi awal.

Berdasarkan Tabel 3 di atas dapat terlihat nilai *insertion loss* simulasi berbeda dengan realisasi. Hal tersebut disebabkan dalam realisasi terdapat *tangen loss* yang dimiliki substrat PCB Rogers Duroid 5880 sebesar 0,0004-0,0009 dan memiliki redaman konduktor, sedangkan pada saat simulasi nilai *tangen loss* diatur pada nilai nol yang berarti tidak ada *loss* pada substrat PCB. Selanjutnya, semakin kecil saluran resonator maka akan semakin besar redaman konduktor dimana lebar saluran resonator pada perancangan ini sebesar 0,5 mm.

Selanjutnya didapatkan hasil pengukuran yang berbeda untuk *return loss* pada simulasi dan realisasi. Hal ini disebabkan oleh *mismatch impedance* pada *port input* atau *output* dengan saluran transmisi sehingga gelombang akan dipantulkan kembali dan nilai *return loss* menjadi kurang baik. *Mismatch impedance* dapat disebabkan oleh konektor SMA yang kurang baik. Nilai *return loss* juga mempengaruhi nilai *insertion loss*. Hal ini disebabkan ketika gelombang masuk pada *port input* dan tidak ada yang dipantulkan, maka gelombang tersebut masuk secara maksimal ke dalam filter dan akan dikeluarkan oleh *port output*, sehingga *insertion loss* yang terjadi hanya disebabkan oleh substrat PCB.

Faktor lainnya yang dapat mempengaruhi nilai *insertion loss* dan *return loss* tidak sesuai spesifikasi adalah terjadinya pengikisan tembaga pada PCB ketika mengganti konektor dan terjadi korosi. Kemudian, *mismatch impedance* juga menyebabkan parameter *bandwidth* tidak dapat diukur pada spesifikasi *return loss* yang diinginkan yaitu 14 dB karena *return loss* yang diperoleh bernilai kurang dari 14 dB, maka *bandwidth* diukur pada frekuensi *cut-off* 3 dB dan diperoleh nilai *bandwidth* yang mengalami penyempitan. Dari respons frekuensi antara simulasi dan realisasi terlihat bahwa respons frekuensi pada realisasi lebih kasar dan memiliki banyak *ripple* dibanding dengan simulasi. *Mismatch impedance* menyebabkan beberapa pantulan gelombang elektromagnetik, yang menghasilkan *ripple*. Hal tersebut dapat disebabkan oleh konektor, bahan PCB, dan kabel [10].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan proses perancangan, perhitungan, simulasi, dan realisasi *bandpass filter* menggunakan *casing* diperoleh frekuensi 9290-9680 MHz dengan frekuensi tengah 9485 MHz dan *bandwidth* 390 MHz. *Insertion loss passband* yang diperoleh sebesar 2,5 dB dan *return loss passband* yang diperoleh sebesar 7,9 dB yang mana keduanya belum memenuhi spesifikasi. Dapat disimpulkan bahwa *bandpass filter* dengan metode *trisection hairpin resonator* dengan kopling silang campuran berhasil direalisasikan dan menghasilkan dua buah *transmission zeroes*. Adanya kopling silang campuran menghasilkan respons frekuensi quasielliptic dengan *transmission zeroes* di atas dan dibawah *passband*. Penggunaan orde rendah dari metode *trisection hairpin* dapat menghasilkan filter yang selektif dan tajam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terimakasih untuk pihak-pihak yang terlibat dalam penelitian ini, khususnya kepada Direktur Politeknik Negeri Bandung, Ketua Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Bandung dan Dosen Program Studi Teknik Telekomunikasi Politeknik Negeri Bandung sehingga penelitian dapat dijalankan serta terlaksana sebagaimana mestinya.

REFERENSI

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons inc, 1998.
- [2] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [3] A. Zakharov, S. Rozenko and M. Ilchenko, "Two Types of Trisection Bandpass Filters With Mixed Cross-Coupling," *IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS*, pp. 1531-1309, 2018.
- [4] N. T. Anggraini, Elisma and H. Arisesa, "Perancangan dan Realisasi BPF pada Frekuensi X-Band Menggunakan Metode Square Open Loop Resonator untuk Aplikasi Radar Pengawas Pantai," in *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar*, Bandung, 2021.
- [5] Slameta and S. Muslimawati, "Perancangan Bandpass Filter untuk Radar Cuaca dengan Metode Hairpin Meander Fractal Resonator pada Frekuensi 9 GHz," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 4, no. 2, pp. 243-252, 2019.
- [6] N. E. Novian and E. Sulaeman, "Realisasi Bandpass Filter Untuk Radar Pendeteksi Cuaca Pada Frekuensi 5600 MHz Dengan Metoda Trisection Bandpass Filter Berbasis Split Ring Resonator," *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 2022.
- [7] C. Engineering, *Filter Frekuensi*, Jakarta: Binus University, 2023.
- [8] E. Sulaeman, *Teknik Frekuensi Tinggi dan Gelombang Mikro*, Politeknik Negeri Bandung, 2023.
- [9] M. S. Priyanto, "Perancangan dan Realisasi Band Pass Filter Trisection Pada Band NR 3500 MHz Berbasis Resonator Meandered Split Ring," Politeknik Negeri Bandung, Bandung, 2022.
- [10] EDN, "Understand ripples in RF performance measurements: Theory and Experiments," EDN, 4 February 2013. [Online]. Available: <https://www.edn.com/understand-ripples-in-rf-performance-measurements-theory-and-experiments/>. [Accessed 18 May 2023].