

Penggunaan Struktur CSRR untuk Peningkatan Kinerja BPF Berbasis *Substrate Integrated Waveguide*

Junas Haidi^{1,2}, Novelita Rahayu³, Achmad Munir¹

¹ Laboratorium Radio Telekomunikasi dan Gelombang Mikro, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

² Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Bengkulu 38371, Indonesia

³ Pusat Riset Teknologi Penerbangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bogor, Jawa Barat 16350, Indonesia

[Diserahkan: 9 Februari 2025, Direvisi: 18 Juli 2025, Diterima: 27 November 2025]

Penulis Korespondensi: Junas Haidi (33222006@std.stei.itb.ac.id)

INTISARI — Makalah ini mengeksplorasi pemanfaatan struktur *complementary split ring resonator* (CSRR) untuk meningkatkan kinerja *bandpass filter* (BPF) berbasis *substrate integrated waveguide* (SIW). BPF berbasis SIW yang didesain menggunakan material RO 4003C dengan nilai permitivitas 3,38 dan rugi-rugi dielektrik 0,0027, dibuat dalam bentuk empat persegi panjang dengan ukuran 37,5 mm (panjang) × 35 mm (lebar) × 1,52 mm (tinggi). BPF berbasis SIW terdiri atas permukaan SIW dengan ukuran 22,4 mm (panjang) × 35 mm (lebar) dan 28 *via*. Pada bagian permukaan SIW dibuat CSRR berbentuk persegi panjang berukuran 4 mm (panjang) × 4 mm (lebar). Untuk mengoptimalkan kinerja BPF berbasis SIW, 12 CSRR dikonfigurasi menjadi enam baris dan dua kolom. Berdasarkan hasil eksplorasi yang telah dilakukan, jarak antara baris dan kolom CSRR secara substansial memengaruhi kinerja BPF. Makin dekat jarak baris antar-CSRR, makin jauh pergeseran frekuensi kerja kedua BPF ke arah frekuensi rendah. Penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW berhasil menurunkan nilai koefisien kopling dari 0,38 menjadi 0,28. Penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW telah menyebabkan nilai koefisien transmisi (S_{21}) menurun dari -2,32 dB menjadi -0,70 dB, yang berarti meningkatkan kinerja BPF sebesar 1,62 dB. Penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW juga telah menurunkan nilai koefisien refleksi (S_{11}) dari -4,56 dB menjadi -10,96 dB atau meningkatkan kinerja BPF sebesar 6,4 dB.

KATA KUNCI — *Bandpass Filter* (BPF), Kopling, *Complementary Split Ring Resonator* (CSRR), *Substrate Integrated Waveguide* (SIW).

I. PENDAHULUAN

Bandpass filter (BPF) adalah salah satu perangkat frekuensi radio (*radio frequency*, RF) yang sering digunakan pada bagian pengirim dan penerima data atau informasi. BPF berfungsi sebagai pengatur frekuensi kerja pada sistem komunikasi nirkabel. BPF dapat dibuat menggunakan *waveguide*, mikrostrip, maupun yang lainnya. Keuntungan desain filter menggunakan mikrostrip adalah kemudahan dalam merealisasikan frekuensi kerja dan lebar pita (*bandwidth*) yang dibutuhkan. BPF yang menggunakan teknologi mikrostrip juga memungkinkan untuk diintegrasikan dengan metode lain, seperti metode *defected ground structure* (DGS) [1], *split ring resonator* (SRR) [2], [3], dan *substrate integrated waveguide* (SIW) [4], [5]. Peningkatan kinerja BPF berbasis SIW dapat dilakukan dengan cara memasang dua baris *via* logam di dalam substrat dielektrik. Selain itu, metode SIW dapat menerapkan gabungan beberapa metode untuk meningkatkan kinerja BPF [6], [7].

Teknologi berbasis SIW banyak diterapkan pada BPF dan antenna karena memiliki keunggulan rugi-rugi radiasi yang rendah. BPF berbasis SIW berfungsi mengubah kinerja BPF dari pita frekuensi tunggal menjadi multipita (*multiband*) [8], [9]. Metode SIW juga digunakan untuk memperkecil dimensi BPF, dalam satuan panjang gelombang *waveguide* [10], [11]. BPF berkerja berdasarkan frekuensi kerja, lebar pita, koefisien refleksi, dan koefisien transmisi. Lebar pita adalah salah satu parameter yang penting untuk menentukan kecepatan transfer data. Peningkatan lebar pita pada BPF dapat dilakukan dengan membuat BPF berbasis SIW, yang pada bagian tengahnya dibuat slot berbentuk elips [12]. BPF pita lebar (*wideband*) dapat dibuat dengan teknik Chebyshev lima kutub yang disusun dalam lima lapis untuk memperkecil nilai kopling pada BPF [13].

BPF pita ultra lebar (*ultra-wideband*) dapat dibuat menggunakan metamaterial [14] dan teknik SIW. Pada permukaan BPF, tiga *complementary split ring resonator* (CSRR) berbentuk persegi ditempatkan secara vertikal di antara baris pertama dan baris kedua dari *via*. Pada bagian *groundplane*, dua CSRR berbentuk persegi dan satu CSRR berbentuk lingkaran disusun mengikuti pola CSRR yang terdapat pada permukaan BPF [15]. BPF pita lebar juga dapat dirancang menggunakan teknik SIW dengan menyusun lima lapisan SIW pada struktur BPF [16]. Untuk meningkatkan lebar pita dan kinerja BPF, dapat digunakan metode DGS, slot, *parasitic*, dan CSRR [17]. Penambahan DGS dengan bentuk lingkaran di bawah CSRR dapat meningkatkan lebar pita [18].

Ukuran perangkat RF yang kecil sangat diperlukan agar tidak diperlukan tempat yang besar dan menjadi praktis sebagai perangkat bergerak. Untuk memperkecil ukuran BPF, pengembangan material yang digunakan serta metode desain tertentu dapat diterapkan. Teknik CSRR dapat digunakan untuk memperkecil ukuran perangkat RF hingga mencapai 23,85%, dengan membebaskan CSRR bentuk lingkaran pada *patch* [19]. Teknik CSRR bentuk lingkaran juga dapat memperkecil ukuran perangkat RF hingga mencapai 59% [20]. Miniaturisasi BPF dengan empat CSRR juga dapat dilakukan menggunakan metode *half mode substrate integrated waveguide* (HMSIW), dengan cara memotong setengah filter, sehingga hanya tersisa dua CSRR pada filter [8]. Penggunaan CSRR pada BPF, selain berfungsi untuk meningkatkan lebar pita dan miniaturisasi, juga dapat berfungsi untuk membuat BPF bekerja pada multipita [21]. Penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW telah mengoptimalkan kinerja BPF [22].

BPF dengan kinerja optimal, seperti lebar pita yang besar, dapat diterapkan dalam teknologi 5G. Frekuensi kerja pada

teknologi 5G dibagi menjadi tiga kategori, yaitu pita rendah (*low-band*), yang bekerja pada rentang frekuensi 0,6 GHz hingga 1 GHz; pita menengah (*middle-band*) pada frekuensi 1 GHz hingga 6 GHz; dan pita tinggi (*high-band*) pada frekuensi 24 GHz hingga 40 GHz. Teknologi 5G yang paling banyak dikembangkan umumnya beroperasi pada kategori pita menengah dan pita tinggi. BPF berbasis SIW yang dirancang untuk beroperasi pada frekuensi pita menengah dalam aplikasi 5G dapat dibuat menggunakan berbagai metode, salah satunya adalah metode HMSIW. BPF berbentuk lingkaran diubah menjadi setengah lingkaran, dengan resonator setengah lingkaran yang dilengkapi dengan slot berbentuk U di tengahnya. Selain itu, di pinggir resonator ditambahkan *stub* sirkuit terbuka berbentuk L [23].

Desain filter untuk aplikasi 5G dapat menggunakan metode BPF *hairpin*. BPF dibuat menggunakan *stripline* berbentuk jepit rambut, sedangkan bagian *groundplane* menggunakan DGS yang berbentuk persegi dan persegi panjang [24], [25]. Metode *nonuniform transmission lines* dan *interdigital bandpass filter* dapat digunakan untuk merancang BPF yang diaplikasikan pada teknologi 5G [26]. BPF dibuat menggunakan *stripline* dan dilengkapi dengan lima saluran umpan yang diletakkan di tengah *stripline* [27]. Teknik *stub loaded multiple mode resonator* (SL-MMR) dapat digunakan untuk merancang BPF yang berfungsi sebagai pendukung teknologi 5G. Penggunaan SL-MMR pada BPF dilakukan dengan cara memasang *stub* di tengah *stripline* dan di bawah *stub* tersebut dipasang dua elemen parasitik [28]. BPF dibuat dengan menggabungkan cabang berbentuk U dan cabang berbentuk L, yang dapat meningkatkan lebar pita [29].

BPF dapat dibuat menggunakan metoda LC dengan cara membuat *stripline* berbentuk simbol positif (+) yang berfungsi sebagai induktans dan membuat celah yang berfungsi sebagai kapasitans [30]. BPF juga dapat diaplikasikan pada teknologi 5G dengan menggunakan metode penyaring penguat daya, yaitu dengan cara membuat filter garis berpasangan jalur ganda [31]. BPF yang bekerja pada pita tinggi dapat dibuat dengan menggunakan dua resonator mode ganda, yang membentuk enam kutub transmisi dan empat titik nol transmisi [32]. BPF yang bekerja pada frekuensi pita tinggi dapat dibuat dengan menggunakan resonator bentuk T hibrida pada saluran transmisi. Struktur BPF dibuat dari konfigurasi masukan diferensial, keluaran diferensial, dan masukan diferensial tunggal [33]. BPF untuk aplikasi teknologi 5G pada pita tinggi dapat dibuat dengan menggunakan resonator berbentuk *loop* persegi panjang yang dibebani dengan rintisan saluran impedans bertingkat di bagian tengahnya [34].

Penelitian-penelitian sebelumnya umumnya meningkatkan lebar pita dengan menggunakan metode DGS, SIW, dan parasitik. Berdasarkan kajian terhadap berbagai literatur, penelitian ini mengidentifikasi adanya gap analisis berupa kebutuhan untuk meningkatkan lebar pita BPF melalui penggabungan frekuensi kerja multipita menjadi satu frekuensi tunggal. BPF umumnya dapat dibuat menggunakan *waveguide* konvensional. Akan tetapi, karena *waveguide* konvensional memiliki dimensi yang besar, penelitian ini menggunakan teknologi mikrostrip yang berukuran lebih kecil serta mudah didesain dan difabrikasi. Penggabungan frekuensi kerja multipita menjadi satu frekuensi dengan lebar pita yang besar dilakukan melalui pengembangan teknologi *waveguide* konvensional menjadi mikrostrip berbasis SIW dengan struktur CSRR.

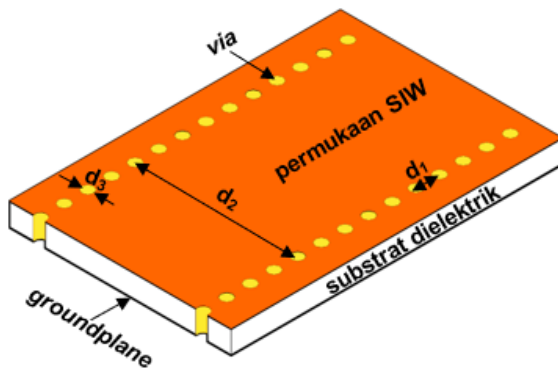
BPF yang dibuat menggunakan teknologi mikrostrip berbasis SIW umumnya menghasilkan frekuensi kerja multipita dengan lebar pita yang relatif sempit. Penggabungan frekuensi kerja multipita pada BPF berbasis SIW dilakukan dengan menambahkan struktur CSRR, yang berperan dalam menurunkan nilai S_{11} di antara frekuensi kerja pertama dan kedua, sehingga menyebabkan lebar pita menjadi lebih lebar. Perbaikan kualitas nilai S_{11} di antara frekuensi kerja pertama dan kedua bergantung pada pengaruh medan listrik yang dihasilkan oleh struktur CSRR. Makin besar medan listrik yang dihasilkan oleh struktur CSRR, makin baik perbaikan nilai S_{11} di antara frekuensi kerja pertama dan kedua. Untuk membuat BPF pita lebar yang dapat diaplikasikan pada teknologi *broadband*, perbaikan nilai S_{11} di antara frekuensi kerja pertama dan kedua ditargetkan berada di bawah -10 dB.

Untuk meningkatkan kinerja BPF yang lebih baik agar dapat diaplikasikan pada teknologi 5G, masih perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai manfaat CSRR pada BPF berbasis SIW. Jarak antarbaris *via* sangat berpengaruh terhadap frekuensi kerja BPF, sehingga penelitian ini difokuskan untuk karakterisasi efek jarak antarbaris *via* terhadap frekuensi kerja BPF. Kinerja BPF juga dipengaruhi oleh bentuk CSRR, jumlah CSRR, dan jarak antar-CSRR, sehingga penelitian ini juga difokuskan pada efek penambahan jumlah CSRR dan efek jarak antar-CSRR terhadap kinerja BPF berbasis SIW. Peningkatan medan listrik akibat penggunaan CSRR pada permukaan SIW bertujuan untuk memperbaiki nilai S_{11} dan S_{21} . Hasil dari penelitian mengenai efek dari penambahan CSRR diharapkan dapat meningkatkan kinerja BPF secara signifikan. Kinerja BPF berbasis SIW dengan CSRR diharapkan dapat diaplikasikan pada teknologi 5G.

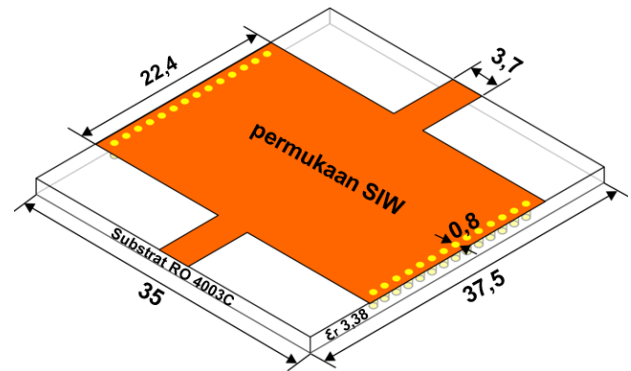
II. TAHAPAN PENELITIAN

Untuk memfokuskan penelitian pada peningkatan kinerja BPF menggunakan struktur CSRR, diperlukan perumusan tahapan penelitian yang sistematis guna memperoleh hasil yang diharapkan. Secara garis besar, penelitian yang dilakukan dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu desain, fabrikasi, dan pengukuran. Tahapan desain adalah tahapan pertama pada penelitian, yang dibagi menjadi dua, yaitu tahapan desain BPF berbasis SIW dan tahapan desain BPF berbasis SIW dengan CSRR. Tahapan desain BPF berbasis SIW difokuskan pada dimensi *patch*, dimensi *via*, jarak antar-*via*, jumlah *via*, dan frekuensi kerja BPF. Sementara itu, tahapan desain BPF berbasis SIW dengan CSRR difokuskan pada jumlah CSRR, jarak antarbaris CSRR dan jarak antarkolom CSRR. Tahapan desain BPF berbasis SIW dengan struktur CSRR dilakukan hingga diperoleh perbaikan nilai S_{11} di antara frekuensi kerja pertama dan kedua yang bernilai kurang dari -10 dB.

Setelah tahapan desain BPF selesai, dilakukan tahapan fabrikasi. Tahapan fabrikasi adalah realisasi BPF berbasis SIW dan realisasi BPF berbasis SIW menggunakan jumlah CSRR yang optimal. Setelah tahapan fabrikasi selesai, dilanjutkan dengan tahapan pengukuran keluaran BPF berbasis SIW dan keluaran BPF berbasis SIW dengan CSRR. Pengukuran S_{11} atau *return loss* (RL) serta S_{21} atau *insertion loss* (IL) dilakukan terhadap hasil realisasi BPF berbasis SIW dan BPF berbasis SIW dengan CSRR. Kemudian, dilakukan analisis dan perbandingan hasil eksperimen BPF berbasis SIW dengan BPF berbasis SIW menggunakan CSRR. Analisis difokuskan pada kinerja BPF, terutama pada nilai parameter S, lebar pita, dan faktor Q (*quality factor*).



Gambar 1. Ilustrasi struktur BPF berbasis SIW.



Gambar 2. Desain BPF berbasis SIW (dalam satuan mm).

III. DESAIN DAN KONFIGURASI

A. BPF BERBASIS SIW

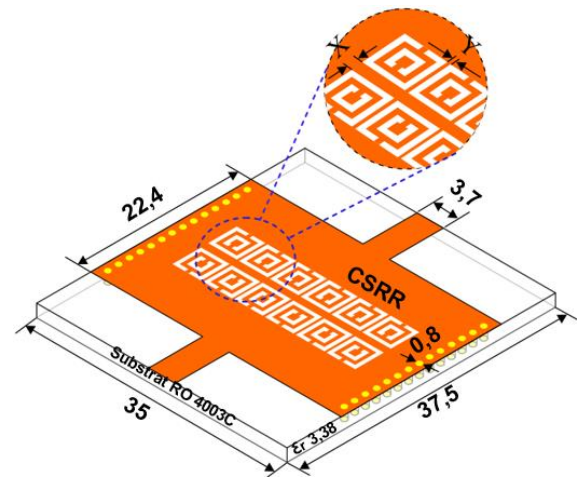
Gambar 1 memperlihatkan ilustrasi struktur SIW yang terdiri atas permukaan SIW, substrat, *groundplane*, dan *via*. Bagian-bagian dari SIW, seperti bentuk *patch*, ketebalan substrat, bentuk *groundplane*, diameter *via*, dan jarak antar-*via*, sangat memengaruhi kinerja BPF berbasis SIW. Frekuensi *cut-off mode* TE (f_{c-mn}) pada SIW dapat dihitung menggunakan (1) dan (2) [35], dengan c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa dengan nilai 3×10^8 m/s, ϵ_r adalah permitivitas relatif material dielektrik, μ_r adalah permeabilitas relatif material dielektrik, m adalah jumlah setengah panjang gelombang di arah transversal lebar, n adalah jumlah setengah panjang gelombang di arah transversal tinggi, a_{eff} adalah lebar efektif struktur SIW, d_1 adalah jarak antar-*via*, d_2 adalah jarak antarbaris *via*, d_3 adalah diameter *via*, dan h adalah tebal substrat dielektrik.

$$f_{c-mn} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2} \quad (1)$$

$$a_{eff} = d_1 - \frac{d_3^2}{0,95d_2} \quad (2)$$

Desain BPF berbasis SIW dengan menggunakan material Roger RO 4003C pada frekuensi kerja 3,5 GHz dapat dilihat pada Gambar 2. Spesifikasi material Roger RO 4003C yang digunakan pada desain BPF berbasis SIW adalah sebagai berikut: tebal 1,524 mm, permitivitas (ϵ_r) sebesar 3,38, dan rugi-rugi dielektrik sebesar 0,0027. BPF berbasis SIW dirancang dengan bentuk persegi panjang yang memiliki dimensi 37,5 mm (panjang) \times 35 mm (lebar) \times 1,524 mm (tebal), serta dimensi *patch* sebesar 22,4 mm (panjang) \times 35 mm (lebar). Saluran transmisi didesain berbentuk *stripline* dengan dimensi 3,7 mm (lebar) \times 7,5 mm (panjang).

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan (1) dan (2), didapatkan ukuran diameter *via* sebesar 0,8 mm dan jarak antar-*via* sebesar 1,5 mm. Berdasarkan ukuran *patch*, diameter *via*, dan jarak antar-*via*, total *via* yang digunakan adalah sebanyak 28 *via*. *Via* yang dibebankan pada *patch* disusun menjadi dua baris; baris di samping kiri *patch* sebanyak 14 *via* dan sebelah kanan *patch* sebanyak 14 *via*. Jarak antarbaris *via* sangat menentukan frekuensi kerja BPF berbasis SIW, sehingga diperlukan perhitungan untuk mendapatkan posisi jarak yang optimal. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan (1) dan (2), jarak antarbaris *via* yang didapat adalah sebesar 33 mm.



Gambar 3. Desain BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR (dalam satuan mm).

B. BPF BERBASIS SIW DENGAN CSRR

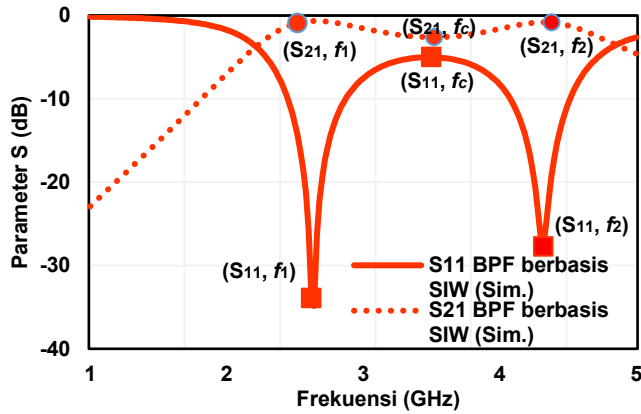
Gambar 3 menunjukkan ilustrasi desain BPF berbasis SIW dengan penggabungan 12 CSRR. BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR didesain menggunakan material RO 4003C. Struktur BPF berbasis SIW dengan CSRR terdiri atas substrat, *groundplane*, *patch*, *via*, dan CSRR. BPF berbasis SIW dengan menggunakan CSRR memiliki dimensi 37,5 mm (panjang) \times 35 mm (lebar) \times 1,52 mm (tebal). Sementara itu, *patch* BPF didesain dengan dimensi 22,4 mm (panjang) \times 35 mm (lebar). *Via* pada BPF berbasis SIW dengan CSRR didesain berbentuk lingkaran dengan diameter sebesar 8 mm dan jarak antar-*via* sebesar 7 mm. *Via* didesain sebanyak 28 buah yang disusun menjadi dua baris, dengan jarak antarbaris *via* sebesar 33 mm.

CSRR pada BPF berbasis SIW didesain berbentuk persegi dengan dimensi 4 mm (panjang) \times 4 mm (lebar). Tahapan penambahan CSRR dilakukan menjadi tiga tahapan, yaitu tahapan pertama adalah desain BPF berbasis SIW dengan empat CSRR, tahapan kedua adalah penambahan CSRR menjadi delapan CSRR, dan tahapan ketiga yaitu penambahan CSRR menjadi 12 CSRR. Posisi dan susunan CSRR pada permukaan *patch* sangat berpengaruh terhadap kinerja BPF berbasis SIW, sehingga dibutuhkan posisi dan jarak antar-CSRR yang optimal. Desain BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR disusun menjadi dua baris dan dua kolom, dengan jarak antarbaris (Y) sejauh 0,3 mm dan jarak antarkolom (X) sejauh 1 mm.

IV. HASIL SIMULASI

A. BPF BERBASIS SIW

Untuk mendapatkan kinerja BPF berbasis SIW yang baik, perlu dilakukan konfigurasi parameter. Parameter yang perlu



Gambar 4. Parameter S hasil simulasi desain BPF berbasis SIW.

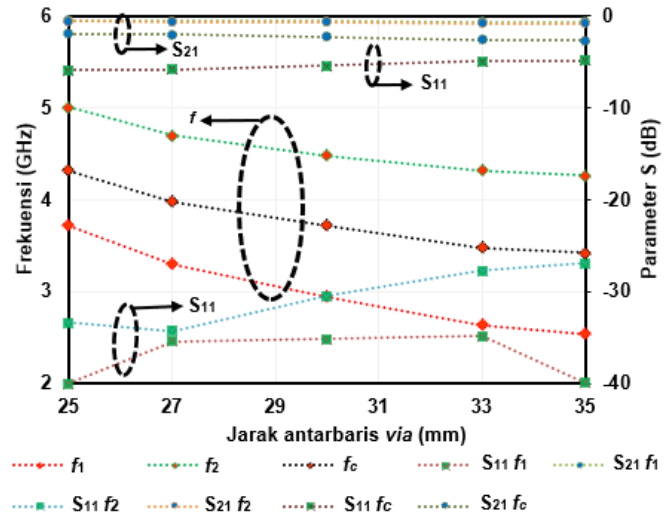
dikonfigurasi adalah ukuran *patch*, ukuran BPF, ukuran *via*, dan jarak antarbaris *via*. Jarak antarbaris *via* sangat berperan untuk menentukan frekuensi kerja kedua pada sebuah filter berbasis SIW. Untuk mendapatkan frekuensi tengah sebesar 3,5 GHz yang terletak di antara frekuensi kerja pertama dan kedua, perlu dilakukan simulasi, dengan memberikan variasi jarak antarbaris *via*. Variasi jarak antarbaris *via* sangat berpengaruh terhadap kinerja frekuensi resonansi kedua. Variasi jarak antarbaris *via* yang telah disimulasikan dimulai dari jarak 25 mm, 27 mm, 30 mm, 33 mm, dan 35 mm. Berdasarkan hasil simulasi variasi jarak yang telah dilakukan, didapatkan ukuran jarak antarbaris *via* optimal pada jarak 33 mm. Jarak antarbaris *via* sangat berpengaruh terhadap kinerja frekuensi resonansi kedua.

Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi parameter S dari kinerja BPF berbasis SIW pada posisi optimal. Berdasarkan Gambar 5, frekuensi kerja BPF berbasis SIW berada pada frekuensi resonansi pertama (f_1) sebesar 2,62 GHz, dengan nilai S_{11} sebesar -34 dB dan nilai S_{21} sebesar -0,90 dB. Sementara itu, frekuensi resonansi kedua (f_2) terletak pada frekuensi 4,32 GHz, dengan nilai S_{11} sebesar -27,73 dB dan nilai S_{21} -0,83 dB. Frekuensi tengah (f_c), yang terletak di antara f_1 dan f_2 , berada pada frekuensi 3,5 GHz, dengan nilai S_{11} sebesar -4,99 dB dan nilai S_{21} sebesar -2,60 dB.

Grafik pergeseran frekuensi kerja BPF berbasis SIW terhadap pengaruh jarak antarbaris *via* dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, variasi jarak antarbaris *via* telah mengakibatkan terjadinya pergeseran frekuensi kerja sejauh 300 MHz per 3 mm. Jarak antarbaris *via* pada BPF berbasis SIW juga berpengaruh terhadap nilai S_{11} pada f_c , walaupun tidak terlalu signifikan. Jarak antarbaris *via* dapat memengaruhi nilai S_{11} pada frekuensi kerja f_2 . Makin dekat jarak antarbaris *via*, makin kecil nilai S_{11} pada frekuensi kerja f_2 . Makin jauh jarak antarbaris *via*, makin besar nilai S_{11} . Pergeseran frekuensi kerja BPF pada frekuensi kerja f_1 lebih jauh dibandingkan dengan pergeseran frekuensi kerja f_2 . Pergeseran frekuensi kerja f_2 diakibatkan oleh penyebaran medan listrik di antara baris *via*. Makin dekat jarak antar-*via*, makin besar medan listrik yang dihasilkan, yang menyebabkan makin jauh pergeseran frekuensi kerja f_2 ke arah frekuensi tinggi.

B. BPF BERBASIS SIW DENGAN CSRR

Penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW bertujuan untuk meningkatkan kinerja BPF. Untuk mendapatkan kinerja BPF berbasis SIW yang optimal, perlu dilakukan konfigurasi studi parameter. Konfigurasi studi parameter yang perlu dilakukan seperti konfigurasi dimensi CSRR, jarak antarkolom

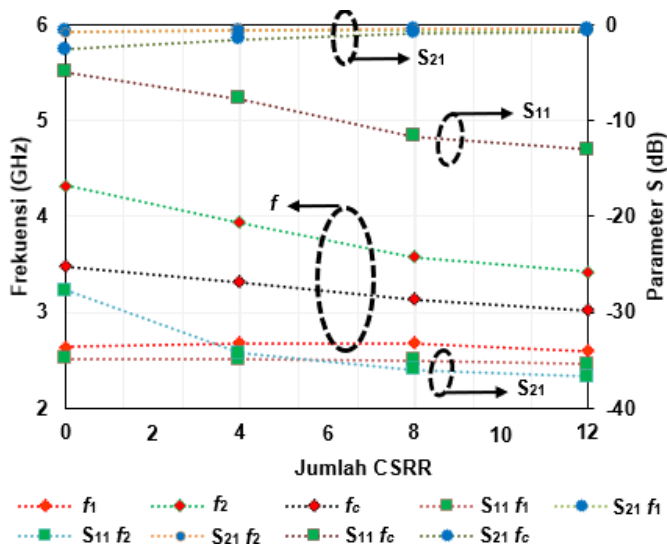


Gambar 5. Efek frekuensi kerja BPF berbasis SIW terhadap variasi jarak antarbaris *via*.

CSRR, jarak antar barisCSRR, dan jumlah CSRR yang digunakan. Variasi penambahan jumlah CSRR pada BPF berbasis SIW dilakukan dalam tiga tahapan simulasi. Tahap simulasi pertama yaitu BPF berbasis SIW dibebani dengan empat CSRR, tahapan simulasi kedua BPF berbasis SIW dibebani dengan delapan CSRR, dan tahapan ketiga adalah BPF berbasis SIW dibebani dengan 12 CSRR. Untuk melihat efek jumlah CSRR terhadap kinerja BPF berbasis SIW, telah dilakukan studi parameter jarak antar-CSRR. Studi parameter jarak dibagi menjadi dua tahap, yaitu studi parameter jarak antarbaris dan studi parameter jarak antarkolom.

Penambahan empat CSRR pada BPF berbasis SIW dapat meningkatkan kinerja filter, yaitu menurunkan nilai S_{11} antara frekuensi kerja f_1 dan frekuensi kerja f_2 dari -5 dB menjadi -7,7 dB. Penambahan empat CSRR membuat frekuensi kerja f_2 bergeser ke arah frekuensi rendah, yaitu dari frekuensi 4,32 GHz menjadi 3,94 GHz, atau bergeser sejauh 380 MHz. Penambahan empat CSRR pada BPF berbasis SIW tidak terlalu berpengaruh terhadap frekuensi kerja f_1 , baik itu pergeseran frekuensi ataupun nilai S_{11} . Penambahan empat CSRR pada BPF berbasis SIW menghasilkan peningkatan intensitas medan listrik di sekitar area CSRR, yang berkontribusi terhadap penurunan nilai S_{11} sebesar -2,7 dB dalam rentang frekuensi kerja antara f_1 dan f_2 . Berdasarkan hasil simulasi penambahan empat CSRR pada BPF berbasis SIW, telah terbukti bahwa penambahan CSRR dapat meningkatkan kinerja BPF berbasis SIW. Untuk melihat bahwa kinerja BPF berbasis SIW berada pada posisi yang optimal, perlu dilakukan simulasi penambahan jumlah CSRR yang paling optimal pada BPF berbasis SIW.

Untuk meningkatkan kinerja BPF berbasis SIW yang lebih baik, dilakukan simulasi konfigurasi peningkatan jumlah CSRR dari empat menjadi delapan CSRR. CSRR disusun menjadi empat baris dan dua kolom, yang diletakkan di tengah *patch* BPF berbasis SIW. Hasil simulasi BPF berbasis SIW dengan delapan CSRR adalah BPF bekerja pada frekuensi f_1 sebesar 2,68 GHz dan frekuensi f_2 sebesar 3,94 GHz. Berdasarkan hasil simulasi, penambahan CSRR hanya berpengaruh pada nilai S_{11} di frekuensi kerja f_1 , sedangkan frekuensi kerja f_2 tidak dipengaruhi oleh penambahan CSRR. Penambahan delapan CSRR pada BPF berbasis SIW mengakibatkan frekuensi kerja f_2 bergeser ke arah frekuensi rendah sejauh 720 MHz dan menyebabkan nilai S_{11} menurun

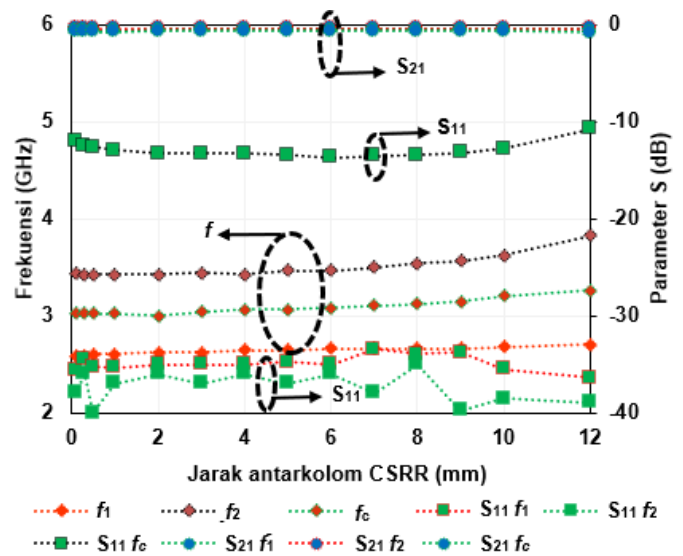


Gambar 6. Efek kinerja BPF berbasis SIW terhadap penambahan CSRR.

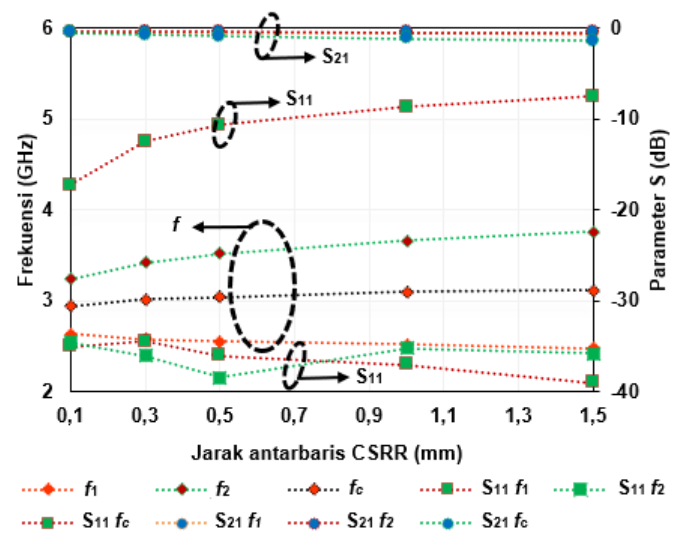
menjadi -9 dB. Berdasarkan hasil simulasi, pembebanan delapan CSRR telah meningkatkan kinerja BPF berbasis SIW, dengan membuat nilai S_{11} di antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 menurun dari -5 dB menjadi -11,6 dB. Efek peningkatan besar medan listrik yang disebabkan oleh peningkatan jumlah CSRR dari empat CSRR menjadi delapan CSRR telah berhasil memperkecil nilai S_{11} di antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 sebesar -6,6 dB.

Untuk mendapatkan kinerja BPF berbasis SIW yang optimal, dilakukan simulasi dan konfigurasi penambahan jumlah CSRR pada BPF berbasis SIW. Desain yang dilakukan adalah penambahan CSRR bertingkat mulai dari empat CSRR ditingkatkan menjadi delapan CSRR dan ditingkatkan menjadi 12 CSRR yang dibebankan pada BPF berbasis SIW. Berdasarkan hasil simulasi pada BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR, BPF bekerja di frekuensi 2,6 GHz dan frekuensi kerja kedua di frekuensi 3,41 GHz. Penambahan 12 CSRR pada BPF berbasis SIW tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap frekuensi kerja f_1 dan f_2 , tetapi sangat signifikan terhadap nilai S_{11} yang terletak di antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 . Penambahan 12 CSRR telah meningkatkan medan listrik secara signifikan di sekitar CSRR, yang mengakibatkan terjadi peningkatan kinerja BPF berbasis SIW pada nilai S_{11} di antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 sekitar -8 dB. Gambar 6 memperlihatkan hasil simulasi penambahan jumlah CSRR terhadap kinerja BPF berbasis SIW.

Optimalisasi fungsi CSRR pada BPF berbasis SIW dilakukan melalui studi parameter untuk menentukan letak penempatan CSRR yang paling optimal. Studi parameter posisi CSRR pada BPF berbasis SIW dibagi menjadi dua bagian, yaitu studi parameter jarak antarkolom (X) dan studi parameter jarak antarbaris (Y). Simulasi studi parameter CSRR dilakukan pada jarak antarkolom, dimulai dari jarak 0,1 mm sampai dengan jarak 12 mm. Berdasarkan hasil simulasi studi parameter CSRR yang dilakukan, didapatkan jarak antarkolom yang optimal yaitu dari jarak 1 mm sampai dengan jarak 5 mm. Jarak antarkolom pada CSRR tidak terlalu berpengaruh terhadap kinerja BPF. Makin jauhnya jarak antarkolom CSRR membuat frekuensi kerja filter sedikit bergeser ke arah frekuensi tinggi. Pengaruh medan listrik yang dihasilkan dari perubahan jarak antarkolom CSRR tidak terlalu signifikan terhadap kinerja BPF berbasis SIW. Gambar 7 memperlihatkan efek variasi jarak antarkolom CSRR terhadap kinerja BPF berbasis SIW.



Gambar 7. Efek variasi jarak antarkolom CSRR terhadap kinerja BPF berbasis SIW.



Gambar 8. Efek perubahan jarak antarbaris CSRR terhadap kinerja BPF berbasis SIW.

Gambar 8 memperlihatkan ilustrasi kinerja BPF berbasis SIW terhadap perubahan jarak antarbaris CSRR. Untuk mendapatkan kinerja BPF berbasis SIW yang optimal, dilakukan studi parameter jarak antarbaris CSRR. Untuk mendapatkan posisi jarak antarbaris CSRR yang optimal, dilakukan simulasi variasi jarak dari 0,1 mm sampai dengan 1,5 mm. Efek dari posisi perubahan jarak antarbaris CSRR sangat signifikan terhadap kinerja BPF berbasis SIW. Makin dekat jarak antarbaris CSRR, makin besar medan listrik yang dihasilkan oleh gabungan CSRR. Medan listrik yang dihasilkan oleh jarak antar-CSRR yang sangat dekat telah memengaruhi kinerja BPF berbasis SIW. Variasi jarak antarbaris CSRR mengakibatkan terjadinya pergeseran frekuensi kerja BPF berbasis SIW. Makin jauh jarak antarbaris CSRR, makin jauh juga pergeseran frekuensi kerja f_2 ke arah frekuensi tinggi. Makin dekatnya jarak antarbaris CSRR membuat frekuensi kerja f_1 dan f_2 bergeser ke arah frekuensi yang lebih rendah.

Untuk mendapatkan koefisien kopling pada BPF berbasis SIW dengan CSRR, telah dilakukan karakterisasi jarak antarkolom CSRR. Karakterisasi pengaruh jarak antarkolom CSRR dilakukan pada jarak X sejauh 0,1 mm, 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, dan 10 mm. Variasi jarak antarkolom CSRR

TABEL I
PENAMBAHAN CSRR PADA BPF BERBASIS SIW

X (mm)	4 CSRR		8 CSRR		12 CSRR	
	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)
0,1	2,66	3,94	2,66	3,58	2,57	3,44
1	2,68	3,94	2,68	3,58	2,60	3,41
3	2,68	3,94	2,70	3,60	2,62	3,44
5	2,68	3,98	2,70	3,64	2,64	3,47
7	2,70	4,02	2,72	3,70	2,66	3,53
10	2,70	4,12	2,74	3,86	2,69	3,70

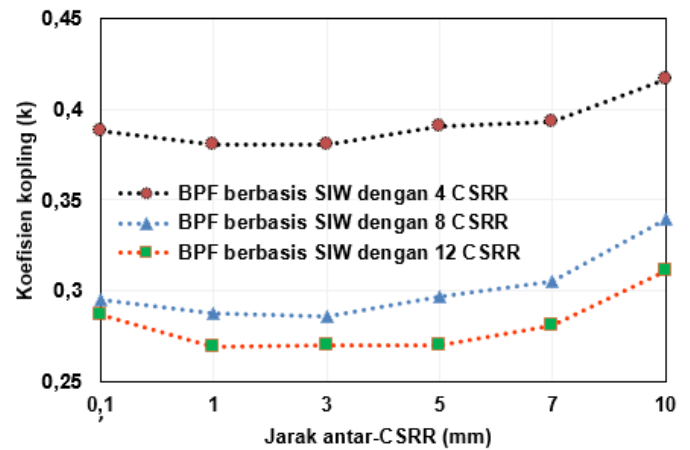
dilakukan pada BPF berbasis SIW dengan empat CSRR, BPF berbasis SIW dengan delapan CSRR, dan BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR. Dari karakterisasi jarak antarkolom CSRR yang telah dilakukan, didapatkan nilai frekuensi kerja f_1 dan f_2 . Jarak antarkolom pada CSRR dapat menggeser frekuensi kerja BPF berbasis SIW. Makin jauhnya jarak antarkolom CSRR membuat frekuensi kerja f_1 dan f_2 bergeser ke arah frekuensi tinggi. Hasil simulasi kinerja BPF terhadap perubahan jarak antarkolom CSRR diperlihatkan pada Tabel I.

Berdasarkan hasil konfigurasi dengan variasi jarak antarkolom CSRR dan variasi penambahan jumlah CSRR, koefisien kopling dapat dihitung menggunakan (3), dengan k adalah koefisien kopling, f_1 adalah frekuensi rendah, dan f_2 adalah frekuensi tinggi. Untuk melihat pengaruh nilai koefisien kopling terhadap perubahan jarak antar-CSRR dan variasi jumlah CSRR, perlu dilakukan studi parameter. Berdasarkan data pada Tabel I dan perhitungan menggunakan (3), nilai koefisien kopling dapat diketahui. Pada BPF berbasis SIW dengan empat CSRR, didapatkan nilai koefisien kopling terendah saat jarak antarkolom CSRR sejauh 1 mm dan 3 mm, yaitu sebesar 0,38. Sementara itu, koefisien kopling tertinggi diperoleh saat jarak antarkolom CSRR sejauh 10 mm, yaitu sebesar 0,42. Berdasarkan nilai koefisien kopling pada BPF berbasis SIW dengan empat CSRR, didapatkan jarak yang optimal sebesar 1 mm dan 3 mm.

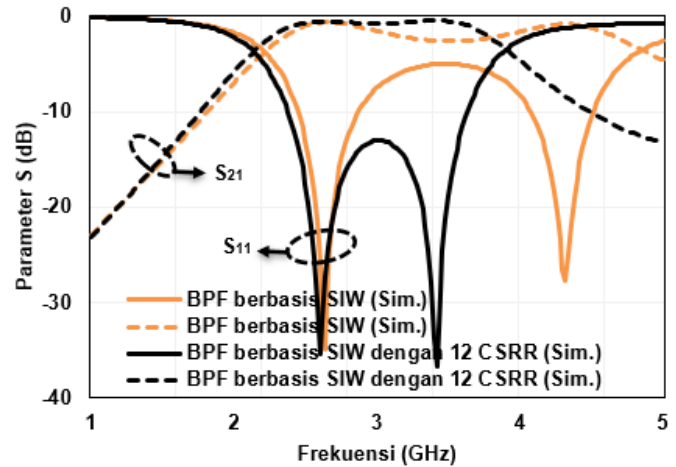
$$k = \frac{2(f_2 - f_1)}{f_2 + f_1} \quad (3)$$

Berdasarkan konfigurasi hasil simulasi pada desain BPF berbasis SIW dengan delapan CSRR, didapatkan jarak antarkolom CSRR yang optimal sejauh 3 mm. Untuk mendapatkan nilai koefisien kopling, dilakukan konfigurasi variasi jarak antarkolom CSRR sejauh 0,1 mm sampai dengan 10 mm. BPF berbasis SIW dengan delapan CSRR bekerja optimal ketika jarak antarbaris CSRR sejauh 0,3 mm dan jarak antarkolom CSRR sejauh 3 mm, dengan nilai koefisien kopling sebesar 0,286. Sementara itu, nilai koefisien kopling tertinggi terjadi ketika jarak antarkolom CSRR sejauh 10 mm. Berdasarkan hasil konfigurasi yang telah dilakukan, didapatkan nilai koefisien kopling yang terendah sebesar 0,27 saat jarak antarkolom CSRR sejauh 1 mm, 3 mm, dan 5 mm. Nilai koefisien kopling tertinggi adalah sebesar 0,31, yaitu saat jarak antarkolom CSRR sejauh 10 mm. Nilai koefisien kopling sangat dipengaruhi oleh jarak antarkolom *via*. Peningkatan jarak antarkolom *via* menyebabkan meningkatnya nilai koefisien kopling antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 .

Berdasarkan hasil perhitungan nilai koefisien kopling BPF berbasis SIW dengan empat CSRR, delapan CSRR, dan 12 CSRR, diperoleh nilai koefisien kopling terendah sebesar 0,27. Berdasarkan nilai koefisien kopling yang didapat, diketahui bahwa BPF berbasis SIW optimal pada pembebanan 12 CSRR,



Gambar 9. Perbandingan koefisien kopling terhadap jumlah CSRR dan jarak antarkolom CSRR.



Gambar 10. Perbandingan parameter S hasil simulasi BPF berbasis SIW dan BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR.

dengan jarak antarbaris CSRR sejauh 0,3 mm dan jarak antarkolom CSRR sejauh 1 mm sampai 5 mm. Setelah didapatkan nilai koefisien kopling terkecil pada saat BPF berbasis SIW diberi 12 CSRR, disimpulkan bahwa kondisi ini adalah kondisi filter yang optimal untuk difabrikasi. Perbandingan nilai koefisien kopling CSRR terhadap variasi jarak antarkolom dapat dilihat pada Gambar 9.

Gambar 10 memperlihatkan perbandingan parameter S dari hasil simulasi pada desain BPF berbasis SIW terhadap desain BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR. Berdasarkan hasil simulasi, BPF berbasis SIW bekerja pada frekuensi 2,28 GHz sampai dengan 4,78 GHz dengan frekuensi tengah 3,52 GHz dan nilai S_{21} lebih dari -3 dB. Berdasarkan nilai S_{11} hasil simulasi, BPF berbasis SIW bekerja pada pita frekuensi ganda. Dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa BPF berbasis SIW bekerja pada frekuensi pertama, f_1 , sebesar 2,64 GHz, dengan nilai S_{11} sebesar -34,85 dB dan nilai S_{21} sebesar -0,65 dB, serta pada frekuensi kedua, f_2 , sebesar 4,32 GHz, dengan nilai S_{11} sebesar -27,7 dB dan nilai S_{21} sebesar -0,8 dB. Penambahan *via* menyebabkan terjadinya pemusatan medan listrik di antara baris *via*, sehingga berdampak pada penurunan kinerja di frekuensi tengah (f_c).

Berdasarkan Gambar 10, BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR dapat meningkatkan lebar pita BPF. Berdasarkan hasil simulasi parameter S, diketahui bahwa BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR bekerja pada pita frekuensi tunggal. Saat nilai S_{21} lebih besar dari -3 dB, BPF berbasis SIW bekerja dari frekuensi 2,2 GHz hingga 3,86 GHz, dengan lebar pita sebesar

1,66 GHz. Saat nilai S_{11} kurang dari -10 dB, BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR bekerja pada frekuensi 2,38 GHz sampai dengan 3,62 GHz atau lebar pita sebesar 1,24 GHz. Penggunaan CSRR pada permukaan BPF berbasis SIW telah membuat perbaikan nilai S_{11} yang terletak di antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 sebesar -8 dB. Berdasarkan hasil konfigurasi yang telah dilakukan, CSRR yang dibuat pada permukaan BPF berbasis SIW dapat menggeser frekuensi kerja f_2 ke arah frekuensi rendah. Setelah frekuensi kerja dan lebar pita diketahui, faktor Q dapat dihitung menggunakan (4).

$$Q = \frac{\sqrt{f_2 f_1}}{BW} = \frac{\sqrt{f_2 f_1}}{f_2 - f_1} \quad (4)$$

Hasil simulasi terhadap BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR menunjukkan bahwa nilai faktor Q sebesar 1,82 diperoleh melalui perhitungan menggunakan (4). Berdasarkan nilai faktor Q yang diperoleh, BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR beroperasi pada lebar pita yang besar dan memiliki selektivitas yang rendah. BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR memiliki nilai S_{21} sebesar -0,74 dB dan S_{11} sebesar -13,03 dB pada frekuensi 3 GHz. Berdasarkan hasil desain dan simulasi yang telah dilakukan, BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR memiliki kinerja yang optimal.

V. FABRIKASI DAN PENGUKURAN

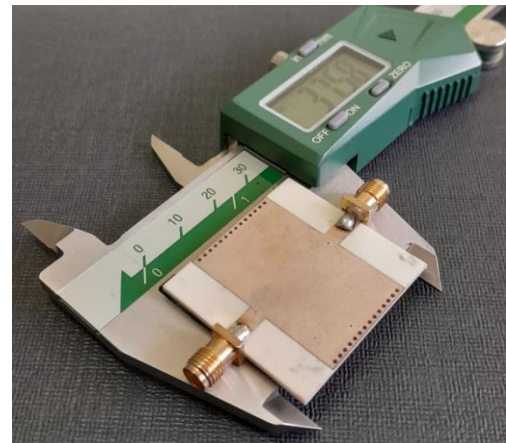
A. FABRIKASI BPF BERBASIS SIW DAN BPF BERBASIS SIW DENGAN 12 CSRR

Gambar 11 memperlihatkan foto hasil fabrikasi BPF berbasis SIW. BPF berbasis SIW difabrikasi menggunakan material RO 4003C dengan tebal substrat 1,52 mm, nilai ϵ_r sebesar 3,38, dan rugi-rugi dielektrik sebesar 0,0027. Realisasi BPF berbasis SIW memiliki ukuran 37,5 mm (panjang) \times 35 mm (lebar) \times 1,52 mm (tinggi), sedangkan ukuran *patch* adalah 22,4 mm (panjang) \times 35 mm (lebar). *Via* yang digunakan pada BPF berbasis SIW adalah sebanyak 28 *via*, yang disusun menjadi dua baris dengan jarak sejauh 33 mm. Konektor yang digunakan untuk proses pengukuran parameter S pada BPF berbasis SIW adalah konektor SMA 50 Ω . Konektor SMA 50 Ω dipasang pada *port 1* sebagai masukan dan dipasang pada *port 2* sebagai keluaran.

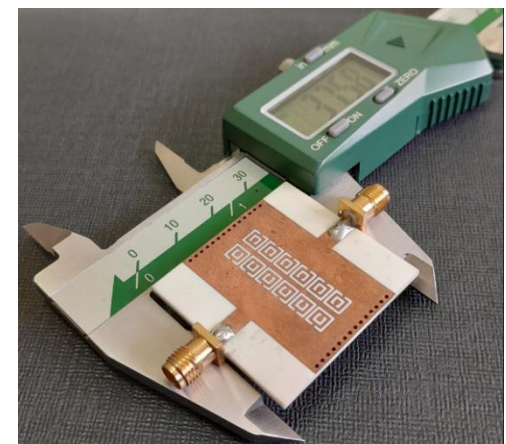
Gambar 12 memperlihatkan foto hasil fabrikasi BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR. Material yang digunakan pada adalah substrat RO 4003C, sama dengan material yang digunakan pada fabrikasi BPF berbasis SIW. Hasil realisasi BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR mempunyai ukuran 37,5 mm (panjang) \times 35 mm (lebar) \times 1,5 mm (tebal), sedangkan CSRR mempunyai ukuran 4 mm (panjang) \times 4 mm (lebar). Seperti tampak pada Gambar 12, CSRR disusun menjadi enam baris dan dua kolom dengan jarak antarbaris sejauh 0,3 mm. Konektor yang digunakan pada BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR adalah konektor SMA 50 Ω . Konektor ini dipasang pada *port 1* dan *port 2* yang berfungsi sebagai masukan dan keluaran.

B. PENGUKURAN BPF BERBASIS SIW DAN BPF BERBASIS SIW DENGAN 12 CSRR

Gambar 13(a) menunjukkan foto proses pengukuran BPF berbasis SIW. Pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dilakukan menggunakan *vector network analyzer* (VNA), yang dihubungkan dengan BPF berbasis SIW ke melalui konektor SMA 50 Ω dan kabel SMA 50 Ω . VNA yang digunakan memiliki spesifikasi rentang frekuensi 100 kHz hingga 20 GHz. Pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dilakukan dengan rentang pengukuran dari 1 GHz hingga 5 GHz.



Gambar 11. Hasil fabrikasi BPF berbasis SIW.

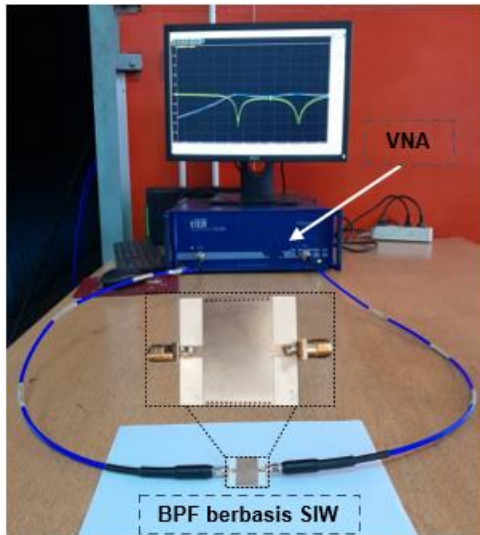


Gambar 12. Foto hasil fabrikasi BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR.

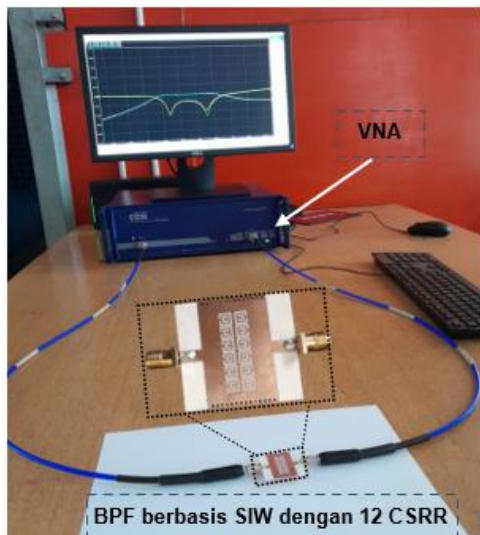
Proses pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR sama dengan proses pengukuran pada BPF berbasis SIW. Pengukuran dilakukan menggunakan VNA dengan rentang frekuensi dari 1 GHz hingga 5 GHz. Pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR ditunjukkan pada Gambar 13(b).

Gambar 14 memperlihatkan perbandingan hasil pengukuran parameter S BPF berbasis SIW terhadap hasil pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR. Berdasarkan hasil pengukuran BPF berbasis SIW, diketahui bahwa filter bekerja pada lebar pita yang besar. BPF berbasis SIW bekerja pada frekuensi 2,34 GHz hingga frekuensi 5 GHz dengan nilai S_{21} maksimum -2,33 dB. Secara keseluruhan, bentuk grafik parameter S hasil simulasi dan pengukuran hampir sama, hanya sedikit terjadi perbedaan nilai S_{21} dari -3 dB menjadi -2,33 dB. Perbedaan nilai S_{21} antara hasil pengukuran dan simulasi sebesar 0,67 dB, yang mengakibatkan filter bekerja dari pita frekuensi ganda menjadi pita frekuensi tunggal. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh material yang digunakan, yang mempunyai nilai *lossy* yang rendah, proses fabrikasi tidak terlalu presisi, atau VNA yang digunakan kurang akurat.

Hasil pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR mendekati nilai parameter S hasil simulasi. BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR bekerja pada frekuensi 2,36 GHz hingga frekuensi 3,88 GHz, dengan nilai S_{21} maksimal sebesar -1,04 dB. Penggunaan 12 CSRR pada BPF berbasis SIW sangat efektif untuk meningkatkan nilai parameter S. Penggunaan 12 CSRR pada BPF berbasis SIW dapat meningkatkan kinerja BPF, dengan meningkatkan medan listrik di sekitar CSRR, sehingga penguatan medan listrik yang



(a)



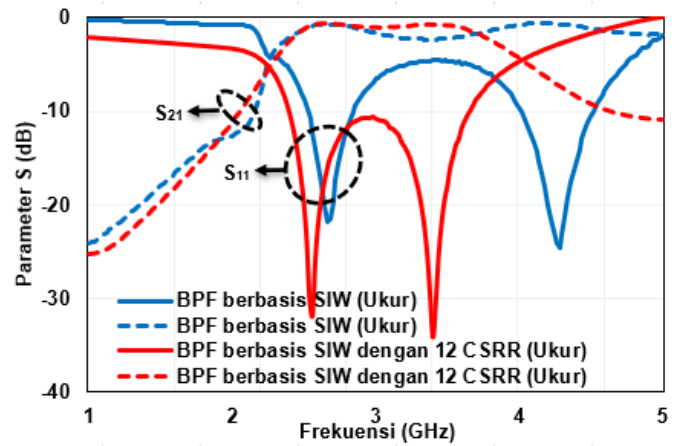
(b)

Gambar 13. Foto proses pengukuran parameter S, (a) BPF berbasis SIW, (b) BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR.

bersumber dari CSRR telah memperbaiki nilai parameter S, terutama S_{11} dan S_{21} . Penguatan medan listrik yang diakibatkan oleh 12 CSRR telah memperbaiki nilai S_{21} sebesar 1,3 dB.

Berdasarkan hasil pengukuran parameter S pada BPF berbasis SIW dan BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR, terjadi peningkatan yang signifikan pada nilai S_{11} . Untuk menganalisis efek CSRR pada nilai S_{11} , dilakukan evaluasi saat grafik S_{11} berada di bawah -10 dB. Berdasarkan hasil pengukuran S_{11} pada BPF berbasis SIW, terdapat dua frekuensi kerja ketika nilai S_{11} kurang dari -10 dB. Frekuensi kerja pertama berada dalam rentang 2,52 GHz hingga 2,84 GHz, sedangkan frekuensi kerja kedua berada dalam rentang 4,02 GHz hingga 4,50 GHz. Berdasarkan grafik hasil pengukuran S_{11} pada BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR, ketika nilai S_{11} kurang dari -10 dB, frekuensi kerja BPF mengalami perubahan dari pita ganda menjadi pita tunggal.

Penambahan 12 CSRR telah meningkatkan nilai S_{11} pada frekuensi kerja f_1 dari -21,8 dB menjadi -31,7 dB dan frekuensi kerja f_2 dari -24,5 dB menjadi -34 dB. Penambahan 12 CSRR mengakibatkan terjadinya penurunan nilai S_{11} antara frekuensi kerja f_1 dan f_2 dari -4,5 dB menjadi -10,6 dB atau sekitar -6,1 dB. Penambahan jumlah CSRR tidak hanya berpengaruh



Gambar 14. Perbandingan hasil pengukuran parameter S BPF berbasis SIW dan BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR.

TABEL II
PERBANDINGAN BPF BERBASIS SIW MENGGUNAKAN CSRR DENGAN PENELITIAN SEBELUMNYA

Referensi	f_0 (GHz)	S_{21} (dB)	Lebar Pita (GHz)	Faktor Q	Dimensi (mm)
[7]	6,75	-2,77	7,00	0,96	-
[8]	6,00	-0,79	1,09	5,50	46 × 27
[36]	1,94	-1,26	0,27	7,18	28 × 14
[37]	5,79	-1,20	2,06	3,73	-
Hasil penelitian	3,12	-0,98	1,52	2,05	37,5 × 35

terhadap penurunan nilai S_{11} , tetapi juga berpengaruh terhadap peningkatan nilai S_{21} . Dengan meningkatnya nilai S_{21} , nilai *insertion loss* akan mengecil, sehingga kinerja BPF makin baik. Penggunaan 12 CSRR telah mengakibatkan terjadinya pergeseran frekuensi f_2 dari 4,28 GHz menjadi 3,4 GHz atau sejauh 880 MHz. Penambahan 12 CSRR juga menyebabkan terjadinya pergeseran frekuensi kerja f_1 dari frekuensi 2,62 GHz ke frekuensi 2,56 GHz atau bergeser sejauh 60 MHz.

Berdasarkan hasil pengukuran parameter S pada BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR, diperoleh nilai S_{21} sebesar -1 dB dan S_{11} sebesar -10,80 dB, dengan faktor Q sebesar 2,05. Perolehan nilai faktor Q yang rendah serta lebar pita yang besar menunjukkan bahwa BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR memiliki kinerja pada frekuensi dengan tingkat selektivitas yang rendah. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR memiliki karakteristik berupa lebar pita yang besar, nilai parameter S yang baik, nilai faktor Q yang rendah, dan selektivitas yang rendah. Dengan demikian, BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR berpotensi untuk diaplikasikan pada teknologi 5G. Tabel II menunjukkan perbandingan BPF berbasis SIW menggunakan 12 CSRR dengan penelitian sebelumnya.

VI. KESIMPULAN

Makalah ini telah membuktikan bahwa penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW dapat meningkatkan kinerja filter. Frekuensi kerja BPF berbasis SIW dipengaruhi oleh jarak antarbaris *via*. Makin dekat jarak baris antar-*via*, makin tinggi frekuensi kerja kedua ke arah frekuensi tinggi. Penambahan CSRR pada BPF berbasis SIW dapat meningkatkan kinerja BPF. Makin banyak CSRR yang digunakan, makin baik nilai parameter S yang terletak di antara frekuensi kerja pertama f_1

dan frekuensi kerja kedua f_2 . Penambahan 12 CSRR pada BPF berbasis SIW telah berhasil menekan nilai S_{11} di antara frekuensi f_1 dengan f_2 sebesar -6,4 dB. Keberadaan 12 CSRR dapat mengubah frekuensi kerja BPF berbasis SIW dari pita ganda menjadi pita tunggal ketika nilai S_{11} kurang dari -10 dB. Hasil realisasi BPF berbasis SIW dengan 12 CSRR bekerja optimal pada frekuensi 2,36 GHz hingga frekuensi 3,88 GHz dengan lebar pita sebesar 1,52 GHz. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan CSRR dalam struktur BPF berbasis SIW berpotensi digunakan dalam teknologi 5G. Desain BPF berbasis SIW ini masih memiliki keterbatasan, khususnya pada luas permukaan yang membatasi jumlah CSRR yang dapat digunakan. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dieksplorasi penggabungan struktur CSRR dengan material magneto-dielektrik, yang berpotensi meningkatkan kinerja filter, khususnya dalam hal respons frekuensi dan miniaturisasi.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Achmad Munir dan Junas Haidi; metodologi, Junas Haidi; perangkat lunak, Novelita Rahayu; validasi, Junas Haidi dan Achmad Munir; analisis formal, Junas Haidi dan Achmad Munir; investigasi, Achmad Munir; sumber daya, Novelita Rahayu; kurasi data, Junas Haidi dan Achmad Munir; penulisan—penyusunan draf asli, Junas Haidi dan Achmad Munir; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Achmad Munir; visualisasi, Novelita Rahayu; pengawasan, Achmad Munir; administrasi proyek, Achmad Munir dan Junas Haidi; akuisisi pendanaan, Achmad Munir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini disponsori oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia melalui Program Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat dengan Skema Penelitian (Penelitian Disertasi Doktor tahun 2024) nomor. kontrak induk 036/E5/PG.02.00.PL/2024 dan nomor kontrak turunan 339/IT1.B07.1/SPP-LPPM/VI/2024.

REFERENSI

- [1] L. Wang dkk., "A 28-GHz compact substrate-integrated waveguide bandpass filter with defected ground structure using TGV technology," *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 13, no. 12, hal. 2008–2015, Des. 2023, doi: 10.1109/TCPMT.2023.3333410.
- [2] D. Jiang dkk., "Tunable microwave bandpass filters with complementary split ring resonator and liquid crystal materials," *IEEE Access*, vol. 7, hal. 126265–126272, Jun. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924194.
- [3] M. Hu dkk., "Diverse SRRs loaded millimeter-wave SIW antipodal linearly tapered slot filter with improved stopband," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 12, hal. 8902–8907, Des. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3090854.
- [4] A.R. Azad dan A. Mohan, "Single- and dual-band bandpass filters using a single perturbed SIW circular cavity," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 29, no. 3, hal. 201–203, Mar. 2019, doi: 10.1109/LMWC.2019.2893379.
- [5] J. Haidi dan A. Munir, "Incorporation of CSRRs for bandwidth enhancement of SIW bandpass filter," dalam *2023 Photonics Electromagn. Res. Symp. (PIERS)*, 2023, hal. 992–996, doi: 10.1109/PIERS59004.2023.10221510.
- [6] N. Ismail, A. Latip, E.A.Z. Hamidi, dan A. Munir, "Defected ground structure for characteristic enhancement of CSRR-based substrate integrated waveguide bpf," dalam *2019 Photonics Electromagn. Res. Symp. - Spring (PIERS-Spring)*, 2019, hal. 1557–1560, doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017506.
- [7] A. Latip, N. Ismail, O.T. Kurahman, dan A. Munir, "Effect of DGS utilization on characteristics of square shaped CSRR-based SIW BPF," dalam *2019 IEEE 5th Int. Conf. Wirel. Telemat. (ICWT)*, 2019, hal. 1–4, doi: 10.1109/ICWT47785.2019.8978219.
- [8] W. Fu dkk., "Modeling and analysis of novel CSRRs-loaded dual-band bandpass SIW filters," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Express Br.*, vol. 68, no. 7, hal. 2352–2356, Jul. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2021.3052574.
- [9] D. Li dkk., "Compact tri-band SIW Bandpass filters with high selectivity and controllable center frequencies using perturbation structure," *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Br.*, vol. 70, no. 11, hal. 4043–4047, Nov. 2023, doi: 10.1109/TCSII.2023.3281496.
- [10] S.K. Thapa dkk., "X-band feedback type miniaturized oscillator design with low phase noise based on eighth mode SIW bandpass filter," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 31, no. 5, hal. 485–488, Mei 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3064602.
- [11] Y. Zheng, H. Tian, dan Y. Dong, "Miniaturized, wide stopband filter based on shielded capacitively loaded SIW resonators," *Chin. J. Electron.*, vol. 33, no. 2, hal. 456–462, Mar. 2024, doi: 10.23919/cje.2023.00.057.
- [12] C.M. Gutiérrez, J. Hinojosa, dan A. Alvarez-Melcon, "A technique for the passband and stopband control of wideband band-pass substrate integrated waveguide (SIW) filters designed with elliptic stepped impedances," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 177, hal. 1–10, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.aeue.2024.155172.
- [13] A. Gupta dan A.A. Khan, "Substrate integrated waveguide bandpass filter with wide upper stopband," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 191, hal. 1–6, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.aeue.2025.155663.
- [14] Al-Hasan dkk., "Metamaterial inspired electromagnetic bandgap filter for ultra-wide stopband screening devices of electromagnetic interference," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, hal. 1–9, Agu. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-40567-x.
- [15] S. Udhayan dan K. Shambavi, "Compact single notch UWB bandpass filter with metamaterial and SIW technique," *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 117, hal. 41–46, Jan. 2024, doi: 10.2528/PIERL23113004.
- [16] A.-Q. Zhang, Y. Yi, dan L. Liu, "A dual-wideband bandpass filter with independently designed cutoff frequencies," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 73, no. 1, hal. 631–640, Jan. 2025, doi: 10.1109/TMTT.2024.3417936.
- [17] J. Haidi dan A. Munir, "Performance characteristics of SIW-based BPF with square-shaped CSRR incorporation," dalam *2023 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. USNC-URSI Radio Sci. Meet. (USNC-URSI)*, 2023, hal. 799–800, doi: 10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238088.
- [18] H. Nusantara, A. Latip, Zulfi, dan A. Munir, "Utilization of CSRR and DGS on wideband SIW bandpass filter," dalam *2022 Int. Workshop Antenna Technol. (iWAT)*, 2022, hal. 261–264, doi: 10.1109/iWAT54881.2022.9811071.
- [19] A. Munir, A. Saputra, dan H. Ludyati, "Compact X-band SIW antenna with reduced size using CSRR incorporation," dalam *2018 IEEE Int. RF Microw. Conf. (RFM)*, 2018, hal. 61–64, doi: 10.1109/RFM.2018.8846474.
- [20] A. Saputra, N. Ismail, M. Yunus, dan A. Munir, "Miniaturization of 2.4GHz SIW antenna using complementary split ring resonator," dalam *2018 12th Int. Conf. Telecommun. Syst. Serv. Appl. (TSSA)*, 2018, hal. 1–4, doi: 10.1109/TSSA.2018.8708822.
- [21] A.E. Yousfi, A. Lamkaddem, K.A. Abdalmalak, dan D.S. Vargas, "A miniaturized triple-band and dual-polarized monopole antenna based on a CSRR perturbed plane," *IEEE Access*, vol. 9, hal. 164292–164299, Des. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3134497.
- [22] H. Zhang, W. Kang, dan W. Wu, "Miniaturized dual-band differential filter based on CSRR-loaded dual-mode SIW cavity," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 28, no. 10, hal. 897–899, Okt. 2018, doi: 10.1109/LMWC.2018.2867082.
- [23] A. Iqbal dkk., "Multimode HMSIW-based bandpass filter with improved selectivity for fifth-generation (5G) RF front-ends," *Sensors*, vol. 20, no. 24, hal. 1–15, Des. 2020, doi: 10.3390/s20247320.
- [24] S. Saleh, W. Ismail, I.S.Z. Abidin, dan M.H. Jamaluddin, "5G hairpin and interdigital bandpass filters," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 12, no. 6, hal. 71–79, Jul. 2020, doi: 10.30880/ijie.2020.12.06.009.
- [25] S.A. Shandal, "Design and implementation of a novel 5G hairpin bandpass filter with defected ground structure," *Int. J. Elect. Comput. Eng. Syst.*, vol. 16, no. 2, hal. 99–107, Jan. 2025, doi: 10.32985/ijeces.16.2.2.
- [26] S. Saleh, M.H. Jamaluddin, F. Razzaz, dan S.M. Saeed, "Compact 5G nonuniform transmission line interdigital bandpass filter for 5G/UWB reconfigurable antenna," *Micromachines*, vol. 13, no. 11, hal. 1–15, Nov. 2022, doi: 10.3390/mi13112013.
- [27] O.C. Massamba, F.M. Mbango, dan D. Lilonga-Boyenga, "Four subbands from dual mismatched wideband bandpass filter for

- 5G/WAS/Wi-Fi/WiMAX/WLAN applications,” *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, vol. 2023, no. 1, hal. 1–13, Mar. 2023, doi: 10.1155/2023/4713995.
- [28] M.F. Alnahwi dkk., “A low-cost microwave filter with improved passband and stopband characteristics using stub loaded multiple mode resonator for 5G mid-band applications,” *Electronics.*, vol. 10, no. 4, hal. 1–15, Feb. 2021, doi: 10.3390/electronics10040450.
- [29] J. Wang, S. Yu, X. Yang, dan X. Liu, “Bandpass filter for 5G sub-6 GHz bands,” *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 116, hal. 79–85, Jan. 2024, doi: 10.2528/PIERL23120301.
- [30] L. Nouri dkk., “A simplified and efficient approach for designing microstrip bandpass filters: Applications in satellite and 5G communications,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 177, hal. 1–10, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.aeue.2024.155189.
- [31] M. Boumalkha dkk., “Design of highly efficient filtering power amplifier with a wideband response for sub-6 GHz 5G applications,” *Results Eng.*, vol. 24, hal. 1–8, Des. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102905.
- [32] Y. Le dkk., “A high-selective multiple-mode bandpass filter design, applicating in both millimeter-wave 5G and WiFi systems,” *Microelectron. J.*, vol. 149, hal. 1–8, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.mejo.2024.106250.
- [33] M. Kebe, B. Mohammad, dan M. Sanduleanu, “Differential-to-differential and single-ended-to-differential bandpass filters for 5G applications,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 141, hal. 1–10, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.aeue.2021.153977.
- [34] F. Kiouach, B. Aghoutane, dan M.E. Ghzaoui, “Novel microstrip bandpass filter for 5G mm-wave wireless communications,” *e-Prime - Adv. Elect. Eng. Electron. Energy*, vol. 6, hal. 1–6, Des. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100357.
- [35] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, AS: John Wiley & Sons, 2012.
- [36] B. Yin dan Z. Lin, “A novel dual-band bandpass SIW filter loaded with modified dual-CSRRs and Z-shaped slot,” *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 121, hal. 1–7, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.aeue.2020.153261.
- [37] L. Yang dkk., “A novel wideband bandpass filter based on CSRR-loaded substrate integrated folded waveguide,” *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, vol. 30, no. 6, hal. 1–9, Feb. 2020, doi: 10.1002/mmce.22181.