

PERANCANGAN BAND PASS FILTER MIKROSTRIP MEANDER LOOP RESONATOR PADA FREKUENSI 2,4 GHz UNTUK UAV

DESIGN OF BAND PASS FILTER MICROSTRIP MEANDER LOOP RESONATOR at 2.4 GHz FREQUENCY FOR UAV

Ananda Satria Utama ¹, Dharu Arseno ², Edwar ³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹adindadwitaazzahra@student.telkomuniversity.ac.id, ²darseno@telkomuniversity.ac.id,

³edwarm@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Beberapa tahun belakangan ini perkembangan teknologi di Indonesia, dalam bidang foto udara berkembang semakin pesat. Salah satu manfaat yang bisa digunakan yaitu untuk pemetaan dalam skala besar. Di Indonesia, penyediaan informasi geospasial masih sedikit oleh karena itu dengan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dapat menjadi pilihan. Namun kamera pada UAV tidak dapat melihat apa yang ada dibalik awan sehingga citra terkadang kurang akurat, maka dari itu digunakan radar untuk pengganti kamera sehingga hasil dapat lebih akurat dan dapat membantu peneliti. Sistem radar Gelombang atau sinyal yang dipancarkan melalui antena transmitter dan ditangkap pada antena receiver dalam bentuk gelombang pantul. Dalam hal sistem yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi dan menampilkan citra suatu benda dengan cara memancarkan sinyal. Dalam sistem radar banyak terdapat banyak komponen penyusun, salah satunya adalah *filter*. Untuk mendukung hal tersebut maka perlu dibuat radar *Bandpass Filter* yang berukuran kecil dan bobotnya ringan. Pada penelitian ini digunakan suatu *Bandpass Filter* berbasis mikrostrip dengan model *Meander Loop Resonator* yang dapat memberikan ukuran yang kecil sehingga dapat dengan mudah di aplikasikan pada *Unmanned Aerial Vehicle*. Filter akan dirancang pada frekuensi tengah 2.4 GHz dengan lebar *bandwidth* ≥ 180 MHz serta *insertion loss* dan *return loss* yaitu ≤ -3 dB dan ≥ -10 dB. Hasil realisasi filter mendapatkan nilai *insertion loss* -9,6026 dB, *Return loss* -24,681 dB, dan *bandwidth* 189 MHz.

Kata kunci : Radar, *Meander Loop Resonator*, *Unmanned Aerial Vehicle*

Abstract

In recent years, technological developments in Indonesia, in the field of aerial photography, have developed rapidly. One of the benefits that can be used is for large-scale mapping. In Indonesia, the provision of geospatial information is still small, therefore the *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) can be an option. However, the camera on the UAV cannot see what is behind the cloud so that the image is inaccurate, therefore radar is used to show the camera so that the results can be more accurate and can help researchers. Radar system Waves or signals that are transmitted through the transmitting antenna and captured at the receiving antenna in the form of reflected waves. In the case of a system that utilizes electromagnetic waves to perform and display an image of an object by transmitting a signal. In a radar system, there are many constituent components, one of which is the filter. To support this, it is necessary to make a *Bandpass Filter* radar which is small in size and light in weight. In this study, a microstrip-based *Bandpass Filter* was used with the *Meander Loop Resonator* model which can provide a small size so that it can be easily applied to *Unmanned Aerial Vehicles*. The filter will be designed at a center frequency of 2.4 GHz with a *bandwidth* of ≥ 180 MHz and *insertion loss* and *return loss* of ≤ -3 dB and ≥ -10 dB. The results of filter realization get *insertion loss* value -9.6026 dB, *return loss* -24.681 dB, and a *bandwidth* of 189 MHz.

Keywords: Radar, *Meander Loop Resonator*, *Unmanned Aerial Vehicle*

1. Pendahuluan

Beberapa tahun belakangan ini perkembangan teknologi di Indonesia, dalam bidang foto udara berkembang semakin pesat. Salah satu manfaat yang bisa digunakan yaitu untuk pemetaan dalam skala besar. Di Indonesia, penyediaan informasi geospasial masih sedikit oleh karena itu dengan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dapat menjadi pilihan. Selain lebih murah dan efisien, UAV juga dapat menghasilkan foto yang bagus. Namun kamera pada UAV tidak dapat melihat apa yang ada dibalik awan sehingga citra terkadang kurang akurat, maka dari itu digunakan radar untuk pengganti kamera sehingga hasil dapat lebih akurat dan dapat membantu peneliti.

Radio Detection and Ranging (RADAR) adalah sistem yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi dan menampilkan citra suatu benda dengan cara memancarkan sinyal [1]. *Synthetic Aperture Radar* (SAR) merupakan radar, yang digunakan untuk melakukan monitoring suatu wilayah atau objek untuk mempermudah peneliti mengetahui keadaan wilayah atau objek tersebut dalam bentuk citra atau gambar [2].

Prinsip kerja Radar yaitu mentransmisikan sinyal berupa chirp signal dari *transmitter* ke objek yang kemudian sinyal chirp ini akan dipantulkan kembali dan diterima oleh antena *receiver*. Data yang diterima tersebut akan disimpan dan akan diproses hingga diperoleh informasi-informasi berupa citra gambar dari objek yang terkena oleh sinyal chirp tersebut [3].

Pada penelitian sebelumnya perancangan *Band Pass Filter* (BPF) *Square Loop Resonator* (SLR) untuk SAR dengan frekuensi kerja 5,8 GHz menghasilkan nilai *insertion loss* sebesar -8,375 dB dan nilai *return loss* sebesar -11,95 dB serta dimensi akhir *filter* tersebut yaitu 2,5 cm × 2,5 cm. Sedangkan pada penelitian perancangan dengan metode yang sama tetapi menggunakan frekuensi kerja 9,51 GHz menggunakan bahan duroid 5880 dan permitivitas dielektrik 2,2 menghasilkan nilai *insertion loss* sebesar -2,89 dB dan *return loss* sebesar -14,1 dB.

Didalam penelitian ini menggunakan model *Meander Loop Resonator* (MLR) karena dimensi akan lebih kecil jika dibandingkan dengan model-model yang lain sehingga *filter* dapat di aplikasikan pada UAV. *Filter Meander Loop Resonator* ini biasanya memiliki kesamaan ukuran dalam dimensinya, ini menjadikannya sesuai untuk sistem yang menginginkan ukuran yang relatif kecil dan untuk menghasilkan *insertion loss* dan *return loss* yang kecil [3].

2. Konsep Dasar

2.1 Radar

Radio Detection and Ranging (RADAR) adalah sistem yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi dan menampilkan citra suatu benda dengan cara memancarkan sinyal [1]. Gelombang atau sinyal yang dipancarkan melalui antena transmitter dan ditangkap pada antena receiver dalam bentuk gelombang pantul. Gelombang pantul ini yang dijadikan analisa untuk mengetahui lokasi atau jenis objek dari suatu wilayah ataupun benda.

2.2 *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)

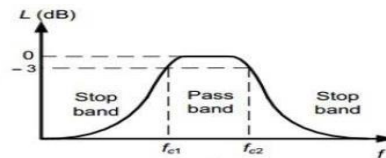
UAV merupakan sebuah teknologi wahana udara tanpa awak yang dapat dikendalikan dari jarak jauh oleh seorang pilot ataupun mampu mengendalikan dirinya sendiri. Penelitian mengenai pengembangan UAV telah banyak dilakukan diberbagai negara tak terkecuali Indonesia.

UAV awal dibuat kebanyakan untuk kepentingan militer. Seiring pengembangan teknologi dan banyak penelitian yang berkaitan dengan UAV, sekarang UAV memiliki fungsi yang berbeda-beda. Salah satu adalah Transportasi UAV yang dapat mengangkut barang pada bagian pesawat, namun untuk UAV jenis helikopter dapat mengangkut barang diluar badan pesawat. Beban yang diberikan pada UAV ini biasa beban yang tergolong ringan dan membutuhkan kecepatan pengiriman dan resiko pengiriman yang tinggi.

Pesawat tanpa awak dapat digunakan pada daerah berbahaya yang apabila dilakukan dengan pesawat berawak akan membahayakan keselamatan awak pesawat tersebut. Daerah yang berbahaya tersebut adalah daerah pusat badai, ketinggian yang berbahaya, daerah rawan perang, dsb.

2.3 Band Pass Filter (BPF)

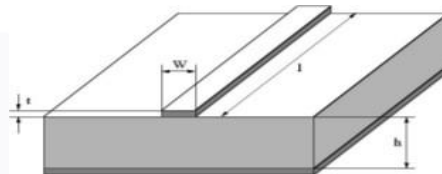
BPF atau *band pass filter* merupakan filter yang meloloskan frekuensi dibawah frekuensi *cutt-off* tinggi (f_{c1}) dan frekuensi diatas frekuensi *cutt-off* rendah (f_{c2}) serta meredam frekuensi yang lainnya [3]. Untuk respon filter dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut



Gambar 2.1. Respon Filter BPF Ideal

2.4 Filter Mikrostrip

Filter mikrostrip adalah sebuah media transmisi yang digunakan di dalam rangkaian RF dan pada penelitian ini digunakan untuk Synthetic Aperture Radar (SAR). Mikrostrip berbentuk papan pipih tipis yang merupakan realisasi dari perancangan filter yang telah di design dan mampu bekerja pada frekuensi tinggi, pertimbangan penggunaan mikrostrip dilakukan karena lebih mudah dalam fabrikasinya dan losses yang ditimbulkan relatif lebih kecil jika dibandingkan dari rangkaian lumped [7]. Secara umum mikrostrip terdiri dari strip konduktor (microstrip line) yang mempunyai lebar sebesar (W) dan ketebalan (t) yang dibentuk diatas substrat dielektrik dengan nilai konstanta dielektrik relatif sebesar ϵ_r , dan memiliki ketebalan sebesar h , dimana pada bagian bawah substrat terdapat konduktor ground plane[3]. Berikut spesifikasi dari filter mikrostrip



Gambar 2. 2 Spesifikasi Filter Mikrostrip

Dari penjelasan diatas maka adanya hubungan antara lebar dan ketebalan (W/h) dengan konstanta dielektrik relatif (ϵ_r) yang di peroleh melalui persamaan 2.1-2.4 [4] :

1. Untuk $W/h < 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A}-2} \quad (2.1)$$

Dengan

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right) \quad (2.2)$$

2. Untuk $W/h > 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln((2 * B) - 1) + \frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (2.3)$$

Dengan

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

Nilai dari konstanta dielektrik efektif dapat dinyatakan dalam persamaan 2.5 untuk nilai $W/h \geq 1$, sedangkan persamaan 2.6 untuk $W/h \leq 1$ [4] :

1. Untuk nilai $W/h \geq 1$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+12\frac{h}{W}}} \right) \quad (2.5)$$

2. Untuk nilai $W/h \leq 1$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-0.5} + 0.004 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2} \left[1 + \frac{10}{U}\right]^{-ab} \quad (2.7)$$

Dimana

$$U = \frac{W}{h}$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{u}{18.1}\right)^3 \right] \quad (2.8)$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (2.9)$$

2.5 Meander Loop Resonator (MLR)

Filter Meander loop Resonator adalah satu dari sekian banyak desain filter mikrostrip yang mempunyai keunggulan dalam hal ukuran. Filter Meander Loop Resonator ini biasanya memiliki kesamaan ukuran dalam dimensinya, ini menjadikannya sesuai untuk sistem yang menginginkan ukuran yang relatif kecil dan efisien gambar 2.10 menunjukkan bentuk dasar filter Meander Loop Resonator [4]. Panjang masing-masing sisi ditentukan oleh λ_g dimana panjangnya akan dipengaruhi oleh frekuensi yang digunakan dengan ε_e yang didapat



Gambar 2. 3 Bentuk Filter Meander Loop Resonator [4]

Untuk mendapatkan ukuran resonator awal maka di gunakan rumus persamaan 2.10 - 2.13 dan di dalam menghitung ε_{ref} yang menggunakan persamaan 2.5- 2.6 dengan w menggunakan persamaan 2.9 [9]

$$W = \frac{c}{2Fc \sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}} \quad (2.10)$$

$$L_{ef} = \frac{c}{2Fc \sqrt{\varepsilon_{ref}}} \quad (2.11)$$

$$\Delta L = 0.412 \times h \times \frac{\varepsilon_{ref} + 0.4}{\varepsilon_{ref} - 0.258} \times \frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} + 0.8} \quad (2.12)$$

$$L = L_{ef} + 2\Delta L \quad (2.13)$$

Dimana W untuk menentukan ukuran resonator awal dengan perubahan ΔL yang menghasilkan lebar resonator L . Sedangkan Ukuran resonator menggunakan $L = W$ dikarenakan berbentuk square maka hanya menggunakan L .

Untuk mendapatkan nilai dari $\lambda_g / 4$ dapat digunakan persamaan 2.14 – 2.16

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c} \quad (2.14)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (2.15)$$

$$L = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.16)$$

Dengan nilai c adalah cepat rambat gelombang cahaya di udara yang memiliki nilai sebesar 3×10^8 m/s, f_c merupakan frekuensi tengah dari filter, ε_{eff} adalah konstanta dielektrik efektif, λ_0 adalah panjang gelombang di udara, dan λ_g adalah panjang gelombang pada saluran transmisi mikrostrip.

Sedangkan Untuk ukuran meander itu sendiri menggunakan persamaan 2.17 - 2.20

$$S = 0.13 \times \lambda_g \quad (2.17)$$

$$W = 0.0417 \times \lambda_g \quad (2.18)$$

$$D = 0.0937 \times \lambda_g \quad (2.19)$$

$$d = (D - (2 \times W)) \quad (2.20)$$

Dimana S merupakan lekukan kedalam dari resonator, kemudian W merupakan tebal resonator, d merupakan gap anatar resonator didalam lekukan S . Dapat dilihat pada gambar 2.4 [3].



Gambar 2. 4 Kopling Antara Resonator dan Saluran [3]

3. Model Sistem dan Perancangan

3.1. Penentuan Spesifikasi Filter

Spesifikasi dalam perancangan *bandpass filter* pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut

:

Tabel 3. 1 Spesifikasi Filter

Spesifikasi	Nilai
Frekuensi Tengah	2400 MHz
Bandwidth	≥ 180 MHz
Impedansi	50 Ω
Insertion Loss	-3 dB - 0 dB
Return Loss	≤ -10 dB

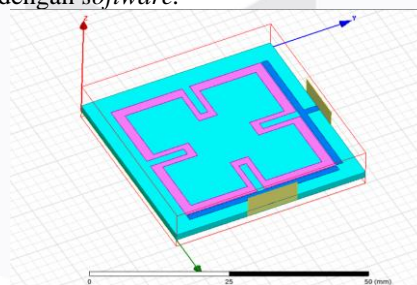
Bahan substrat yang digunakan adalah FR4 Epoxy dikarenakan bentuknya yang stabil dan mudah didapatkan atau dicari.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Substrat

Konstanta Dielektrik (ϵ_r)	4,4
Tebal Dielektrik (d)	1,6 mm

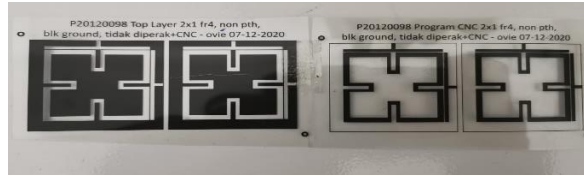
3.2. Perancangan Mikrostrip

Setelah melakukan perhitungan parameter-parameter sehingga membentuk dimensi MLR, maka yang harus dilakukan selanjutnya adalah melakukan simulasi agar mengetahui bentuk model filter. Simulasi sendiri dilakukan dengan *software*.



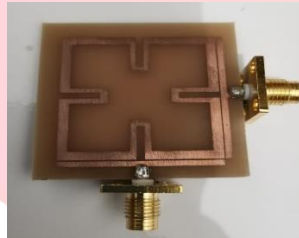
Gambar 3. 1 Filter Simulasi

Setelah melakukan optimasi dengan menggunakan simulasi pada *software*, langkah selanjutnya adalah merealisasikan filter. Dilanjutkan dengan pengukuran kinerja filter menggunakan VNA untuk mengetahui apakah hasil simulasi sama dengan hasil pengukuran. Tahap awal realisasi adalah membuat layout negatif dari filter yang akan dicetak, seperti pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3. 2 Layout Negatif

Setelah filter berhasil dicetak, maka tahap selanjutnya adalah pemasangan konektor SMA pada masing-masing port catuan untuk menghubungkan filter dengan VNA. Hasil realisasi nya seperti pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3. 3 Realisasi Filter

3.3. Optimasi dan Analisa Hasil Pengukuran

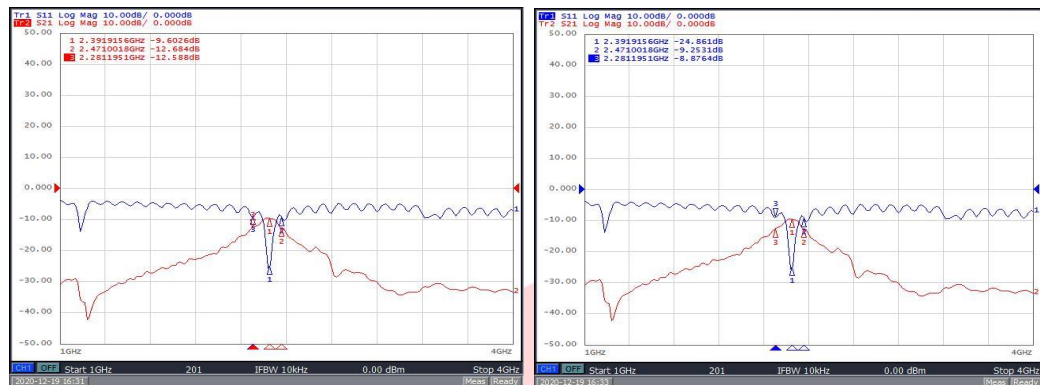
Dari hasil optimasi yang diperoleh maka nilai perancangan yang telah ditentukan oleh spesifikasi *bandpass filter* ini telah tercapai seperti yang diharapkan. Adapun nilai parameter hasil optimasi adalah nilai frekuensi tengah di 2,4 GHz, nilai *insertion loss* di -2,6935 dB, nilai *return loss* di -12,1450 dB, dan *bandwidth* sebesar 180 MHz. Kemudian proses selanjutnya yaitu realisasi bandpass filter.

Sedangkan untuk hasil pengukurannya Pengukuran $S(2,1)$ dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai *bandwidth* dan *insertion loss*. Dari hasil realisasi filter didapatkan nilai *insertion loss* sebesar -9,6026 dB di frekuensi tengah 2,4 GHz, dari hasil pengukuran realisasi filter nilainya jauh dari spesifikasi yang diinginkan. Hasil pengukuran *bandwidth* mendapatkan nilai sebesar 189 MHz, berbeda sekitar 9 MHz dari hasil simulasi dan spesifikasi yang nilainya 180 MHz.

Berdasarkan hasil pengukuran yang berbeda jauh dari spesifikasi yang diharapkan. Kita dapat menganalisis kenapa hasil pengukuran $S(2,1)$ yang tidak diinginkan disebabkan oleh perubahan dimensi pada saat fabrikasi filter, dimana hasil cetaknya terjadi pergeseran dimensi dan pemasangan konektor yang tidak tepat di tengah catuan daya sehingga berpengaruh terhadap nilai *s-parameter* yang sangat sensitif. Oleh karena itu perubahan dalam hasil pengukuran disebabkan oleh beberapa faktor tersebut.

Pengukuran $S(1,1)$ dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai *return loss*. Dari hasil realisasi filter didapatkan nilai *return loss* sebesar -24,681 dB di frekuensi tengah 2,4 GHz, dari hasil pengukuran realisasi filter nilainya masih sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

Hasil *return loss* pengukuran yang didapatkan terlihat berbeda dengan *return loss* hasil simulasi. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena faktor fabrikasi tebal *input/output* resonator dan panjang lekukan, yang nilainya bergeser sekitar ± 0.1 mm – 0.5 mm dari hasil simulasi. Oleh karena itu perubahan dalam hasil pengukuran disebabkan oleh beberapa faktor tersebut.



Gambar 3.4 Hasil pengukuran S21 (kiri) dan S11 (kanan)

Setelah melakukan proses simulasi dan pengukuran, selanjutnya data atau hasil yang didapatkan dikumpulkan menjadi satu sehingga dapat dilihat perbandingan dan perbedaannya antara hasil simulasi, pengukuran, dan spesifikasi awal. Berikut adalah data hasil perbandingan simulasi, pengukuran, dan spesifikasi yang dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Perbandingan Data

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Frekuensi Tengah	2400 MHz	2400 MHz	2400 MHz
Insertion Loss	-3 dB - 0 dB	-2,6935 dB	-9,6026 dB
Return Loss	≤ -10 dB	-12,1450 dB	-24,681 dB
Bandwidth	≥ 180 MHz	180 MHz	189 MHz

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan proses perancangan, simulasi, dan pengukuran bandpass filter mikrostrip *Meander Loop Resonator*, maka yang dapat disimpulkan yaitu :

1. Hasil realisasi filter mendapatkan nilai *insertion loss* -9,6026 dB, *Return loss* -24,681 dB, dan *bandwidth* 189 MHz.
2. Hasil simulasi filter mendapatkan nilai *insertion loss* -2,6935 dB, *return loss* -12,1450 dB, dan *bandwidth* 180 MHz.
3. Dari hasil realisasi bandpass filter *Meander Loop Resonator* terdapat perbedaan dengan hasil simulasinya.
4. Perbedaan hasil realisasi dengan simulasi disebabkan oleh beberapa faktor antara lain proses fabrikasi saat pencetakan, human error saat penyolderan port konektor, dan dimensi hasil pencetakan berbeda dengan dimensi saat simulasi.
5. Dari hasil simulasi dan realisasi didapatkan dimensi PCB atau substrat sebesar 37,6 mm
6. *Bandwidth* filter hasil realisasi mengalami pelebaran sebesar 9 MHz dibandingkan dengan hasil simulasi.
7. *Return loss* hasil realisasi mengalami penurunan sebesar 12,536 dB dibandingkan dengan hasil simulasi.

4.1. Saran

Untuk penelitian selanjutnya penulis memberi saran untuk mengubah menjadi lebih baik, meliputi :

1. Perancangan dapat dilakukan dengan bahan substrat lain yang memiliki kestabilan lebih bagus.
2. Proses fabrikasi atau pencetakan filter harus diperhatikan. Hasil pencetakan filter harus sangat presisi dengan ukuran dimensi pada saat simulasi karena itu sangat berpengaruh pada performansi filter.

3. Proses pemasangan konektor SMA sebaiknya dilakukan oleh ahlinya, agar penyolderan tepat di tengah catuan daya dan timahnya tidak terlalu banyak ataupun terlalu sedikit.

Referensi :

- [1] M. I. Skolnik, Introduction to Radar System, McGraw-Hill Book, 1981.
- [2] G. Franceschetti, R. Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing, 1999.
- [3] I. R. Mafazi, "Miniaturisasi Mikrostrip Band Pass Filter Untuk Aplikasi Radar C-Band", Telkom University, 2018.
- [4] J. S. Hong dan M. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [5] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Kreiger, I. Hajnsek, "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," Microwaves Radar Inst. Ger. Aersp. Cent. DLR., 2013.
- [6] J.T Gonzalez-Partida, P. Alorox-Gonzalez, M. Burgos- Garcia, B.P. DortaNaranjo, "SAR System for UAV Operation with Motion Error Compensation Beyond the Resolution Cell", Universidad Politécnic de Madrid, 2008.
- [7] Y K Chan; Y K Koo, "An Introduction to Synthetic Aperture Radar," PIERB, 2008.
- [8] N. Aeni, "Perancangan Dan Realisasi Generator Chirp Pada Synthetic Aperture Radar (SAR)," 2015.
- [9] Tilekar Shradha, "Comparative Study of rectangular, Square, Circular, And Meander Patch Microstrip Antenna." Deemed University, 2015.
- [10] Edwar, "A Novel of Square Loop Resonator Band Pass Filter by Using CrossShape Input/Output Coupling for 9 GHz Application," IEEE, 2016.
- [11] E. Natanael, "Desain dan Realisasi Filter Square Loop Pada Pita Frekuensi C-Band Untuk Synthetic Aperture Radar (SAR)", Telkom University, 2019.
- [12] M. R. Yusron, "Perancangan dan Realisasi Bandpass Filter Mikrostrip Frekuensi 9610 MHz Untuk Aplikasi Synthetic Aperture Radar Dengan Menggunakan Model Defected Ground Structure Dan Square Loop Resonator", Telkom University, 2018.