

PERANCANGAN SISTEM RECEIVER ADS-B BERBASIS SDR MENGGUNAKAN TEKNOLOGI MIKROSTRIP DENGAN FREKUENSI 1090 MHZ

1st Arka Widyadhana Putra
Teknik Telekomunikasi
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia

arka@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Fannush Shofi Akbar
Teknik Telekomunikasi
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia

fannushakbar@telkomuniversity.ac.id

3rd Muhsin
Teknik Telekomunikasi
Universitas Telkom
Surabaya, Indonesia

mmuhsin@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) merupakan teknologi *surveilans* modern yang digunakan dalam dunia penerbangan untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan kesadaran situasional. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan data navigasi dari pesawat, seperti posisi, kecepatan, dan ketinggian, yang diperoleh melalui GPS. Salah satu komponen utama dalam sistem ADS-B adalah antenna, yang memiliki peran penting dalam transmisi dan penerimaan sinyal. Didalam antenna terdapat filter yang berfungsi sebagai penyaring sinyal dan dapat meningkatkan kinerja sistem ADS-B. Filter mikrostrip dipilih karena sifatnya ringan, ukuran yang kompak dan ekonomis, menjadikannya ideal untuk aplikasi penerbangan khususnya seperti aplikasi ADS-B. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah *bandpass* filter sederhana yang mampu beroperasi secara efektif pada rentang frekuensi 1.080-1.100 MHz. Filter dirancang pada frekuensi tengah 1.090 MHz dengan menggunakan substrat FR-4. Parameter seperti VSWR, *bandwidth*, S-parameter, *return loss*, dan *insertion loss* akan dioptimalkan melalui simulasi menggunakan *software* CST Studio Suite 2019. Hasil desain filter menghasilkan performa optimal yang terintegrasi dengan antenna sebagai sistem penerima ADS-B. Namun, pada realisasinya terjadi pergeseran frekuensi kerja dari 1.090 MHz ke 890 MHz atau sebanyak -18,35%.

Kata kunci— ADS-B, filter *hairpin*, antenna mikrostrip, GPS

I. PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan luas wilayah lebih dari 8,3 juta km² dan ruang udara sekitar 2,6 juta mil laut², berada pada posisi strategis yang menghubungkan jalur penerbangan antara Asia, Australia, dan Oseania. Lalu lintas udara yang melintasi wilayah Indonesia sangat padat, mencakup penerbangan komersial, kargo, penerbangan militer, dan rute internasional. Dalam menghadapi kompleksitas ini, teknologi radar penerbangan memiliki peran sentral sebagai alat utama untuk memantau dan mengatur pergerakan pesawat.

Pada tahun 2007, Indonesia memulai inisiatif strategis bernama “Indonesia *Automatic Dependent Surveillance Broadcast* (ADS-B) System”. Proyek ini diluncurkan untuk secara bertahap membangun infrastruktur ADS B di seluruh wilayah udara nasional. ADS B merupakan teknologi pengawasan pesawat yang bergantung pada data dari sistem navigasi satelit seperti GPS, di mana setiap pesawat secara otomatis memancarkan data posisi, ketinggian, kecepatan, identitas dan arah terbangnya secara berkala kepada stasiun darat dan penerima lain. Dibandingkan radar konvensional, ADS B menawarkan ketepatan dan cakupan yang lebih baik, serta bisa menjadi pelengkap atau pengganti radar tradisional.

Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) menggunakan frekuensi 1090 MHz karena frekuensi ini sudah digunakan oleh transponder dalam sistem pengawasan lalu lintas udara. Dengan memanfaatkan frekuensi yang sama, ADS-B dapat berintegrasi dengan infrastruktur yang ada tanpa memerlukan perubahan signifikan. Selain itu, penggunaan frekuensi 1090 MHz memungkinkan kompatibilitas global, karena frekuensi ini diakui secara internasional untuk komunikasi penerbangan, oleh karena itu frekuensi 1090 MHz ditetapkan menjadi standar utama untuk ADS-B di berbagai negara.

Untuk memastikan sistem dapat menerima sinyal pada frekuensi spesifik tersebut secara optimal, diperlukan komponen yang disebut filter. Filter berfungsi untuk menyaring dan melewatkan sinyal pada frekuensi yang diinginkan sambil menekan frekuensi lainnya yang dianggap sebagai gangguan (*noise*). Dalam penelitian ini, jenis filter yang paling sesuai adalah *bandpass* filter. Perangkat ini dirancang khusus untuk hanya melewatkan rentang frekuensi tertentu dan meredam sinyal di luar rentang tersebut. Dengan demikian, *bandpass* filter memastikan bahwa hanya sinyal ADS-B (1090 MHz) yang akan diproses lebih lanjut.

Tujuannya adalah agar sinyal target dapat diterima dengan kualitas maksimal, tanpa banyak kehilangan daya (*insertion loss* minimal), dan sinyal-sinyal lain di luar frekuensi kerja, baik yang bersifat interferensi maupun *noise* lingkungan, dapat ditekan atau diblokir secara efektif oleh

filter tersebut. Dengan demikian, *bandpass* filter berperan krusial dalam menjaga akurasi, efisiensi, dan keandalan sistem komunikasi atau sensor yang digunakan dalam penelitian ini.

Tipe filter yang digunakan pada penelitian kali ini adalah filter *hairpin*. Alasan utama penggunaan filter *hairpin* dalam ADS-B karena filter ini memiliki struktur yang kompak, ukuran kecil, dan performa baik pada frekuensi operasional ADS-B yaitu 1090 MHz. Filter *hairpin* merupakan pengembangan dari resonator *parallel-coupled* dan *half-wavelength* resonator yang dilipat membentuk huruf "U," sehingga mengurangi panjang resonator dan menghasilkan filter dengan ukuran lebih kecil yang mudah diintegrasikan pada sirkuit mikrostrip.

II. KAJIAN TEORI

A. ADS-B

Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) adalah teknologi pengamatan (*surveillance*) yang digunakan untuk memberikan informasi posisi pesawat di udara. Sistem ADS-B memancarkan (*broadcast*) informasi mengenai posisi terbang, ketinggian terbang, kecepatan terbang, dan parameter lainnya secara lengkap dan otomatis setiap 0,5 detik ke sistem ADS-B *ground station* di darat. Selanjutnya data tersebut dikirimkan ke *display* ATC untuk digunakan oleh ATC dalam memonitoring pesawat terbang seperti posisi terbang, ketinggian terbang, kecepatan terbang, dan parameter lainnya. Jangkauan maksimum dari ADS-B adalah 200 NM (370 km).

Sistem ADS-B sendiri terdiri dari dua komponen utama, yaitu ADS-B *Out* dan ADS-B *In*. ADS-B *Out* adalah perangkat yang secara otomatis memancarkan informasi posisi dan data penerbangan pesawat ke pesawat lain dan ke stasiun penerima di darat secara periodik tanpa intervensi dari pilot atau pengendali lalu lintas udara. Informasi ini kemudian dapat digunakan oleh otoritas pengatur lalu lintas udara untuk memantau dan mengarahkan lalu lintas udara dengan lebih efisien.

Sementara itu, ADS-B *In* adalah sistem yang memungkinkan pesawat menerima informasi dari pesawat lain yang dilengkapi dengan ADS-B *Out*. Dengan demikian, pesawat dapat mengetahui posisi, arah, dan kecepatan pesawat lain di sekitarnya secara langsung dan akurat. Hal ini meningkatkan kesadaran situasional pilot dan membantu dalam penghindaran tabrakan di udara (*airborne conflict avoidance*), terutama di wilayah dengan lalu lintas padat atau minim pengawasan radar [8].

B. Filter Hairpin

Filter digunakan untuk melewatkan sinyal pada frekuensi tertentu dan meredam sinyal pada frekuensi lainnya atau sinyal yang tidak diinginkan. Dengan demikian, filter dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem komunikasi dengan meminimalkan gangguan (*noise*), interferensi antar kanal, serta mengoptimalkan kualitas transmisi dan penerimaan sinyal[7].

Salah satu pendekatan dalam merancang filter elemen terdistribusi yang dikenal sebagai "*hairpin*" menggunakan topologi resonator berbentuk huruf "U" dengan panjang resonator $\lambda/2$ yang tersusun secara paralel. Metode *Parallel Coupled*, yang memanfaatkan saluran terkopel (*Coupled-Line*) dengan panjang $\lambda/4$ dan dilipat sebesar L atau $(\lambda/4)-b$,

di mana b adalah panjang saluran yang tidak terkopel (*uncoupled line*), merupakan pengembangan dari metode *hairpin-line*.

Hairpin-line konvensional dengan resonator yang memiliki panjang resonator $\lambda/4$ pada *parallel coupled*, yang dikopel secara paralel, merupakan salah satu jenis metode *hairpin*. Panjang resonator yang terkopel pada *hairpin-line* adalah L (panjang resonator yang dikopel sepanjang $(\lambda/4)-b$), di mana b adalah panjang saluran yang tidak terkopel (*uncoupled-line*).



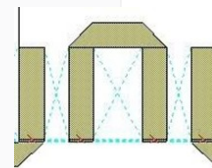
GAMBAR 1
Filter hairpin

Untuk menyederhanakan desain filter, digunakan model dengan saluran berbentuk U. Perancangan filter ini memanfaatkan teknik kopling, di mana besarnya koefisien kopling dapat ditentukan melalui persamaan (1). Nilai koefisien ini sangat penting karena semakin besar nilainya, maka transfer daya akan semakin efisien, yang pada akhirnya menghasilkan bandwidth filter yang lebih lebar.

$$K_{n,n+1} = \frac{BW}{f_c \sqrt{g_n g_{n+1} + 1}} \quad (1)$$

C. Slide Factor

Slide factor merujuk pada saluran yang tidak terhubung langsung dengan filter *hairpin*. Ketika panjang *slide factor* diperpanjang, akan terjadi peningkatan redaman yang lebih besar, yang mengarah pada penurunan efisiensi. Sebaliknya, jika panjang *slide factor* terlalu pendek, maka akan muncul masalah dengan kopling antara saluran yang serupa. Agar performa sistem tetap optimal, panjang minimal *slide factor* harus berada dalam kisaran satu hingga tiga kali panjang resonator.



GAMBAR 2
Jarak slide factor

Panjang *slide factor* yang terlalu pendek dapat menyebabkan saluran-saluran tersebut saling terhubung, menghasilkan efek yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa panjang *slide factor* berada dalam rentang yang tepat agar tidak terjadi kopling yang berlebihan antara saluran. Panjang *slide factor* yang sesuai juga akan menjaga keseimbangan antara redaman dan kualitas transmisi sinyal. Untuk menentukan *slide factor* kita bisa menggunakan persamaan berikut :

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

III. METODE

Dalam proses perancangan filter untuk perancangan receiver ADS-B, terdapat beberapa tahapan yang mendukung jalannya proses perancangan tersebut seperti menentukan

spesifikasi ADS-B, perancangan filter, pengujian filter, dan analisis hasil pengujian filter. *Bandpass* Filter (BPF) bekerja pada *range* tertentu, sehingga perlu dilakukann penentuan spesifikasi terlebih dahulu sebelum melakukan perancangan filter. Dalam perancangan kali ini digunakan material FR-4 dengan ketebalan 1,6 mm dan dengan spesifikasi sebagai berikut :

TABEL 1
Spesifikasi dasar filter

No	Parameter	Nilai
1	Jenis filter	Chebyshev
2	Frekuensi kerja	1080 – 1100 MHz
3	Frekuensi tengah	1090 MHz
4	<i>Bandwidth</i>	20 MHz
5	<i>Insertion loss</i>	≥ -2 dB
6	Impedansi	50 Ω
7	VSWR	< 2 dB
8	<i>Return loss</i>	< -10 dB

Metode *hairpin* dipilih karena memiliki berbagai keunggulan, terutama dalam hal kompaknya ukuran fisik, yang sangat bermanfaat dalam integrasi perangkat berbasis mikrostrip. *Hairpin* resonator merupakan salah satu bentuk dari resonator $\lambda/2$ (*half-wavelength*), yang dilipat dalam bentuk menyerupai penjepit rambut, sehingga mampu menghemat ruang dibandingkan dengan resonator linier biasa. Selain itu, struktur *hairpin* yang sederhana dan simetris menjadikannya mudah diimplementasikan dan memiliki respons frekuensi yang stabil serta *bandwidth* yang cukup lebar, tergantung pada parameter desain seperti jarak antar resonator dan lebar jalur konduktor.

Perancangan dan simulasi filter dilakukan menggunakan *software* CST Studio Suite 2019, yang memungkinkan analisis elektromagnetik 3D secara detail terhadap struktur mikrostrip yang dirancang. Simulasi ini sangat penting untuk memverifikasi performa dari filter, seperti nilai *insertion loss* (S_{21}), *return loss* (S_{11}), dan *bandwidth*, sebelum prototipe fisik diproduksi.

Untuk merancang filter *hairpin* diperlukan beberapa perhitungan dalam prosesnya, seperti orde filter dan ukuran resonator. Orde filter dapat ditentukan dari kurva karakteristik redaman berdasarkan pendekatan chebyshev dengan *ripple* 0.01 dB.

Dalam mencari nilai orde filter, terlebih dahulu mencari nilai dari *fractional bandwidth* (FBW) dengan persamaan berikut.

$$FBW = \frac{BW}{f_0} \quad (3)$$

Setelah nilai FBW didapatkan, selanjutnya mencari nilai transformasi frekuensi *low-pass* ke *band pass filter*.

$$\Omega_s = \frac{1}{FBW} \left(\frac{f_s}{f_0} - \frac{f_0}{f_s} \right) \quad (4)$$

Selanjutnya bisa menentukan nilai orde minimum (n) dari sebuah filter chebyshev dengan persamaan dibawah.

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1x^n \text{Attenuasi}}}{10^{0.1x \text{Ripple}}}}}{\cosh^{-1}(\Omega_c)} \quad (5)$$

Dari persamaan tersebut, didapati untuk penelitian kali ini nilai orde filter (n) adalah 4, yang berarti nilai resonatornya juga akan berjumlah 4.

Setelah menemukan jumlah resonator yang akan digunakan, selanjutnya adalah mencari nilai lebar dan panjang dari resonator tersebut. Untuk mencari nilai lebar resonator dengan impedansi 50 Ω , bisa digunakan persaman berikut.

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

Setelah nilai B ditemukan, maka kita bisa mencari nilai lebar (Wt) resonator dengan persamaan dibawah.

$$\frac{W_t}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (7)$$

Hasil dari lebar resonator untuk saluran resonator dan catuan *input* 50 Ω adalah sebesar 3,02 mm. Selanjutnya adalah mencari nilai panjang resonator dengan persamaan berikut.

$$L_r = \frac{\lambda_g}{2} \quad (8)$$

Namun untuk mencari nilai λ_g digunakan persamaan dibawah.

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (9)$$

Untuk mencari nilai ϵ_{eff} bisa menggunakan persamaan berikut.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \quad (10)$$

Hasil dari perhitungan ini adalah 73,95 mm dan nilai ini harus dibagi 2 sehingga menjadi 36,98 mm.

Filter *hairpin* ini dirancang dengan menggunakan respon *chebyshev* orde 4. Perancangan filter diawali dengan menentukan nilai prototipe filter BPF. Koefisien kopling dapat digunakan untuk mencari jarak antar resonator. Untuk orde 4 dan *ripple* 0.01 dB, respon frekuensi tersebut memiliki parameter seperti yang terdapat pada tabel berikut.

TABEL 2
Nilai respon chebyshev

G1 = 1,1088	G2 = 1,3062	G3 = 1,7704	G4 = 1,3554
-------------	-------------	-------------	-------------

Setelah parameter dikethaui, maka koefisien kopling antar resonator dapat ditentukan dengan perhitungan pada persamaan dibawah.

$$K_{n,n+1} = \frac{BW}{f_c \sqrt{g_n \cdot g_{n+1} + 1}} \quad (11)$$

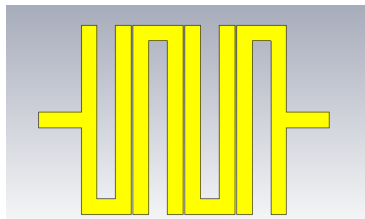
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan perhitungan untuk mencari nilai-nilai parameter yang ada pada resonator *hairpin line* filter, kemudian hasil perhitungan dirangkum dalam tabel berikut.

TABEL 3
Hasil perhitungan sebelum optimasi

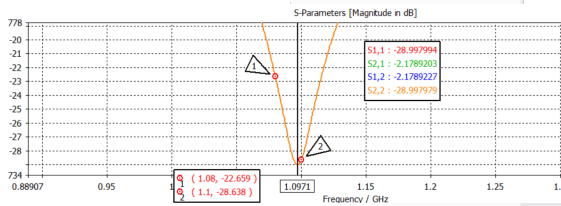
Resonator ke-	Panjang Resonator	Lebar Satuan Catu	Jarak Tapping	Jarak antar Resonator
1	43	18	3.5	0.32
2	43	18	3.5	0.32
3	43	18	3.5	0.32
4	43	18	3.5	0.32

Hasil perhitungan dari Tabel 3 akan diproses ke perancangan filter yang dilakukan menggunakan aplikasi CST Studio Suite 2019. Hasil dari perancangan ini ditampilkan pada Gambar 3.



GAMBAR 3
Hasil perancangan *bandpass filter hairpin*

Hasil Perancangan tersebut kemudian dilakukan *run* pertama pada perancangan, didapatkan hasil yang masih jauh dari spesifikasi yang diharapkan. Pada tahap simulasi didapatkan S-Parameter pada gambar berikut.



GAMBAR 4
Hasil simulasi *S-Parameter*

Terlihat pada gambar frekuensi tengah filter tidak pada frekuensi yang diinginkan yaitu 1090 MHz, sementara frekuensi tengah berada di frekuensi 1.0971 MHz dengan *insertion loss* dengan nilai -28.997994 dB dan nilai *return loss* -2.1789203 dB. Kemudian dari hasil pengukuran BW -3 dB *insertion loss* didapat *bandwidth* filter sebesar 20 dB.

Data hasil pengukuran awal masih menunjukkan karakteristik yang belum sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan, sehingga diperlukan proses optimasi untuk menyesuaikan performa filter dengan target yang ditetapkan. Proses optimasi yang dilakukan secara paralel, mencakup parameter seperti panjang, lebar, *slide factor*, serta jarak antar resonator.

Frekuensi tengah dari simulasi sebelumnya masih belum tepat pada frekuensi kerja yang diinginkan, untuk menggesernya bisa dengan cara memainkan panjang dari saluran resonator. Hasil dari optimasi ini adalah sebagai berikut.

TABEL 4
Hasil optimasi panjang saluran resonator

No	Panjang Saluran Resonator (mm)	Frekuensi Tengah (MHz)	Insertion Loss (dB)
1	45	834	-2.3114907
2	37	105.9	-2.6186396
3	37.5	1044.6	-2.1973111
4	37	1033.2	-2.0529262
5	35	1105.2	-2.8196996
6	35.5	1090	-2.1523547

Dari hasil optimasi panjang saluran resonator didapatkan nilai yang ideal untuk panjang saluran resonator adalah 35.5mm yang menghasilkan frekuensi tengah pada parameter S21 tepat pada frekuensi 1090 MHz dan nilai *insertion loss* yang dihasilkan sebesar -2.1523547 dB. Berikut *layout* filter setelah optimasi panjang saluran resonator.

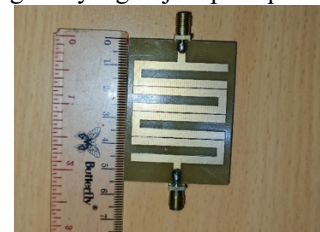
Selanjutnya dilakukan proses optimasi pada jarak spasi antar resonator, di mana parameter ini memiliki pengaruh signifikan terhadap *insertion loss*, *return loss*, serta lebar *bandwidth* dari filter yang dirancang. Jarak antar resonator secara langsung memengaruhi tingkat kopling elektromagnetik antar resonator; jika jarak terlalu dekat, kopling menjadi terlalu kuat, yang dapat memperlebar *bandwidth* namun meningkatkan *insertion loss*. Sebaliknya, jika jarak terlalu jauh, kopling menjadi lemah, sehingga *bandwidth* menyempit dan performa transmisi menurun. Oleh karena itu, optimasi jarak spasi bertujuan untuk menemukan titik keseimbangan antara *bandwidth* yang cukup lebar, *insertion loss* yang rendah, dan *return loss* yang baik agar filter dapat bekerja optimal pada frekuensi tengah yang telah ditentukan.

Berdasarkan data optimasi yang telah dilakukan, penyesuaian dimensi pada masing-masing resonator dilakukan untuk mencapai hasil yang diharapkan. Rincian penyesuaian dimensi dapat dilihat pada tabel dibawah.

TABEL 5
Dimensi filter setelah optimasi

Dimensi	Perhitungan	Optimasi
Tebal patch	0.035	0.035
Tebal substrate	1.6	1.6
Panjang resonator	43	35.5
Lebar resonator	2.92	2.92
Jarak antar resonator 1	0.4	0.32
Jarak antar resonator 2	0.4	0.32

Setelah proses optimasi desain perangkat dengan menggunakan *software* CST Studio Suite 2019 maka langkah selanjutnya adalah melakukan realisasi filter untuk mengukur kinerja dan pengaruh yang terjadi pada proses realisasi

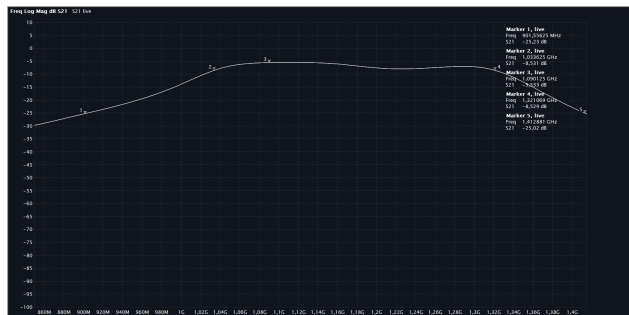


GAMBAR 5
Hasil fabrikasi filter hairpin

Realisasi filter menghasilkan dimensi filter 5,5 cm x 4 cm dengan material substrat FR-4 yang memiliki ketebalan material 1.6mm. Ukuran tersebut memiliki ukuran yang lebih lebar sedikit dibandingkan dengan ukuran pada simulasi di *software* CST Studio Suite 2019. Pelebaran dimensi filter ini akan berdampak pada pergeseran frekuensi kerja pada filter. Kemudian setelah melakukan fabrikasi, kinerja filter diukur pada sisi S-Parameter dan VSWR menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA).

A. Hasil Pengukuran S21 (*Insertion Loss*)

Dalam realisasinya, filter yang dibuat tidak memenuhi target insertion loss ($IL \leq 2$ dB), yang merupakan ukuran daya sinyal yang hilang. Meskipun simulasi awal menunjukkan hasil yang lebih baik, filter fisik justru memiliki IL yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, terutama karena bandwidth yang menjadi lebih lebar dan terjadinya pergeseran frekuensi kerja dibandingkan rancangan semula. Penyimpangan antara hasil simulasi dan realisasi ini umumnya terjadi akibat ketidaksempurnaan dalam proses manufaktur, seperti toleransi material, penyolderan, atau dimensi fisik filter yang tidak presisi.



GAMBAR 6
Hasil Pengukuran S21

Hasil realisasi filter menunjukkan performa yang menyimpang dari desain awal, di mana frekuensi kerjanya bergeser ke 980 MHz akibat ketidaktepatan selama proses fabrikasi. Pada frekuensi baru ini, filter mengalami *insertion loss* yang sangat besar, yaitu -19.04 dB pada frekuensi 980 MHz. Selain itu, *bandwidth* filter melebar secara signifikan menjadi 110 MHz (850 MHz – 1400 MHz), jauh dari target desain sebesar 20 MHz.

TABEL 6
Hasil pengukuran dengan Spectrum Analyzer

Frekuensi	Received Power (dB)
901 MHz	-25.13 dB
1033 MHz	-6.91 dB
1090 MHz	-3.57 dB
1321 MHz	-7.76 dB
1412 MHz	-20.93 dB

Berdasarkan data pada Tabel 6, filter yang diuji menunjukkan karakteristik kerja sebagai *bandpass* filter, yaitu hanya melewatkan sinyal pada rentang frekuensi tertentu dan meredam sinyal di luar rentang tersebut. Terlihat bahwa nilai daya terima (*received power*) paling tinggi terjadi pada frekuensi 1090 MHz sebesar -3,57 dB, diikuti oleh 1033 MHz (-6,91 dB) dan 1321 MHz (-7,76 dB). Hal ini menandakan bahwa filter memiliki respon optimal atau

melewatkan sinyal secara efektif pada rentang sekitar 1030 MHz hingga 1320 MHz. Sementara itu, daya terima pada frekuensi 901 MHz dan 1412 MHz turun drastis masing-masing menjadi -25,13 dB dan -20,93 dB, yang mengindikasikan bahwa sinyal di frekuensi tersebut diredam secara signifikan oleh filter.

B. Hasil Pengukuran S11 (*Return Loss*)

Pengukuran *return loss* yang diperoleh dari hasil realisasi filter menunjukkan bahwa performa pantulan sinyal pada *port input* berada dalam batas yang dapat diterima secara teknis, yakni lebih kecil dari -10 dB (≤ -10 dB).

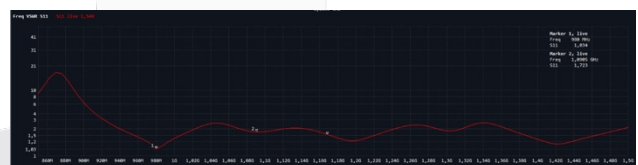


GAMBAR 7
Hasil pengukuran S11

Dari hasil pengukuran ini didapati nilai *return loss* pada frekuensi 1090 MHz sebesar -11,52 dB dan pada frekuensi 980 MHz sebesar -35,44 dB. Walaupun terjadi pergeseran, namun pada frekuensi kerja yang telah ditentukan masih dalam batas baik untuk filter.

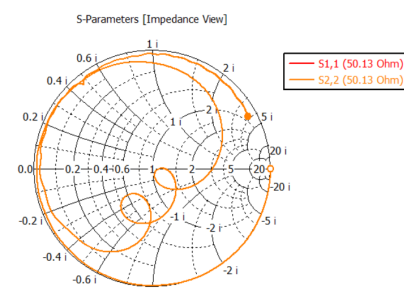
C. Hasil Pengukuran VSWR

Hasil yang didapatkan pada pengukuran VSWR dan impedansi resonator sudah sesuai dengan spesifikasi awal yaitu < 2 dB.



GAMBAR 8
Hasil pengukuran VSWR

Hasil pengukuran dari VSWR berhubungan dengan nilai *return loss*, semakin kecil nilai *return loss* maka VSWR akan semakin mendekati ideal. Berdasarkan hasil pengukuran *return loss* sebelumnya, nilai VSWR menunjukkan 1.892 pada frekuensi tengah 1.109 MHz.



GAMBAR 9
Smith chart VSWR

Grafik tersebut adalah *Smith chart (impedance view)* yang menampilkan lintasan parameter S11 (*port* 1, merah) dan S22 (*port* 2, oranye) terhadap frekuensi, dengan referensi impedansi 50,13 Ω . Lintasan yang mendekati titik pusat *Smith chart* menandakan bahwa impedansi masukan/keluaran mendekati 50 Ω sehingga pencocokan (*matching*) sangat baik, *return loss* kecil dan daya yang dipantulkan rendah di frekuensi kerja filter.

D. Perbandingan Hasil Pengukuran

Hasil yang telah didapat sebelum dibuat dalam bentuk tabel. Perbandingan hasil spesifikasi menunjukkan bahwa proses perancangan filter dengan hasil simulasi perancangan dan membandingkan hasil pengukuran spesifikasi awal yang telah ditetapkan. Berikut perbandingan spesifikasi tahap simulasi dan optimasi hasil pengukuran filter yang telah direalisasikan pada tabel dibawah.

TABEL 7
Hasil perbandingan antar pengukuran

Parameter	Hasil Pengukuran	
	Simulasi	Realisasi
Frekuensi Tengah	1090	980
Rentang Frekuensi	1080-1100 MHz	950-1100 MHz
Bandwidth	20 MHz	140 MHz
Return Loss S11	-28.998447	-17.95 dB
Insertion loss S21	-2.1783361	-6.227 dB
VSWR	1.0735868	1.892 dB

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang sebuah filter hairpin mikrostrip untuk frekuensi ADS-B 1090 MHz, di mana hasil simulasi menunjukkan performa yang sangat baik dan memenuhi semua spesifikasi target. Namun, pada tahap realisasi fisik, terjadi deviasi signifikan akibat toleransi fabrikasi, yang menyebabkan frekuensi kerja bergeser ke 980 MHz dan nilai insertion loss meningkat. Meskipun demikian, filter yang dihasilkan tetap dinilai layak dan fungsional untuk digunakan pada sistem receiver ADS-B, karena rentang bandwidth-nya masih sesuai, serta memiliki pencocokan impedansi dan nilai VSWR yang baik yang menandakan transmisi daya tetap efisien.

REFERENSI

[1] N. Ismail, S. M. Ulfah, I. Lindra, A. S. Awalluddin, I. Nuraida, and M. A. Ramdhani, "Microstrip Hairpin Bandpass Filter for Radar S-Band with Dumbbell-DGS," *Proceeding 2019 5th Int. Conf. Wirel. Telemat. ICWT 2019*, pp. 3–6, 2019, doi: 10.1109/ICWT47785.2019.8978257.

[2] E. N. Situmorang, M. Iqbal, and M. W. Sitopu, "RANCANG BANGUN ANTENA MIKROSTRIP ADS-B BANTU PEMBELAJARAN DI POLITEKNIK PENERBANGAN MEDAN," vol. 8, no. 8, pp. 238–242, 2024.

[3] B. Adli, R. Mardiaty, and Y. Y. Maulana, "Design of Microstrip Hairpin Bandpass Filter for X-Band Radar Navigation," *Proceeding 2018 4th Int. Conf. Wirel. Telemat. ICWT 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ICWT.2018.8527781.

[4] W. A. Prijono and N. K. Rizki, "Perencanaan Rancang Bangun Microstrip Band Pass Filter dengan Struktur Tapped Input Hairpin pada Aplikasi Jaringan Mid-band 5G Telkomsel," *J. EECCIS (Electrics, Electron. Commun. Control. Informatics, Syst., vol. 16, no. 1, pp. 20–23, 2022, doi: 10.21776/jeeccis.v16i1.1492.*

[5] D. S. Caniago, A. A. Muayyad, Y. Wahyu, F. T. Elektro, U. Telkom, and L. I. Pengetahuan, "Perancangan dan Realisasi Bandpass Filter dengan Menggunakan Metode Hairpin Line Untuk Frekuensi Kerja 5,800 GHz-5,900 GHz," *eProceedings Eng., vol. 5, no. 1, pp. 713–720, 2018.*

[6] D. Adhitama, H. Wijanto, and Y. Wahyu, "FILTER BAND-PASS HAIRPIN DENGAN DEFECTED GROUND STRUCTURE UNTUK SYNTHETIC APERTURE RADAR 1 . 27 GHz DESIGN AND REALIZATION HAIRPIN BAND-PASS FILTER WITH DEFECTED GROUND STRUCTURE FOR SYNTHETIC," vol. 4, no. 3, pp. 3422–3429, 2017.

[7] I. Razak et al., "PERANCANGAN BAND PASS FILTER (BPF) METODE HAIRPIN BERBASIS MICROSTRIP PADA FREKUENSI 2,4 GHz," p. 184, 2020.

[8] Rahman Sofian Pasaribu, Much. Furqon Muchaddats, and Dianditama T.R., "1. Rancangan Receiver Ads-B Menggunakan Rtl-Sdr Untuk Pembacaan Data Asterix Di Program Studi Teknik Navigasi Udara," *TNI Angkatan Udar., vol. 3, no. 2, 2024, doi: 10.62828/jpb.v3i2.97.*

[9] M. Alaydrus, "Riset Band Pass Filter Mikrostrip – State of the Art," *J. Telekomun. dan Komput., vol. 6, no. 2, p. 123, 2017, doi: 10.22441/incomtech.v6i2.1152.*

[10] D. Dermawan, P. Setiawan, D. W. Suwanti, and I. Teknologi Nasional Yogyakarta, "Rancang Bangun Receiver Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Menggunakan RTL-SDR R820T2 Flight Aware," *J. Teknol. Elektro, vol. 14, no. 03, pp. 156–165, 2023, doi: 10.22441/jte.2023.v14i3.006.*

[11] N. Fachro Adi, T. Warsito, and N. Pambudiyatno Politeknik Penerbangan Surabaya, "OPTIMALISASI DESAIN BANDPASS FILTER PENERIMA ADS-B PADA FREKUENSI 1090 MHz," *Pros. Semin. Nas. Inov. Teknol. Penerbangan, vol. 4, no. 2548–8112, pp. 1–7, 2020.*

[12] Y. Nurhayati and Susanti, "Implementasi ADSB di Indonesia," *J. Perhub. Udar., pp. 147–162, 2014.*

[13] I. Prasetyani et al., "Evaluasi Pemanfaatan Teknologi Radar Dalam Rangka Penguatan Pertahanan Dan Kedaulatan Wilayah Udara Indonesia," *J. Educ., vol. 5, no. 3, pp. 8324–8332, 2023, doi: 10.31004/joe.v5i3.1620.*

[14] V. B. Pusuluri, V. Mannam, V. A. Sankar Ponnappalli and A. M. Prasad, "Narrowband Hairpin Bandpass Filter for 4G LTE Applications," *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422528.*

[15] Q. Wang, L. Bo, X. Shi and C. Fang, "Simulation Design of Hairpin Microstrip Bandpass Filter at L-band," *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu, China, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618691.*