

RANCANG BANGUN TUNABLE BANDPASS FILTER COMBLINE UNTUK VHF AIR GROUND RADIO COMMUNICATION

Muhammad Arif Sulaiman⁽¹⁾, Toni⁽²⁾, Muh Wildan⁽³⁾, Quwarazmi Golddin Al
Farraz⁽⁴⁾

^{1,2,3}Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, ⁴Inspektorat Jenderal, Kementerian
Perhubungan

e-mail: ¹arif.sulaiman@ppicurug.ac.id, ² toni@ppicurug.ac.id,
³muh.wildan@ppicurug.ac.id, ⁴quwarazmi@gmail.com

Received :
2 Agustus 2023

Revised :
5 September 2023

Accepted :
25 September 2023

Abstrak: Layanan radio komunikasi penerbangan antara pemandu lalu lintas (*Air Traffic Control*) dan penerbang (pilot) harus dijaga dalam kondisi baik tanpa gangguan dan tidak terputus, karena keselamatan penerbangan menjadi prioritas utama. Tujuan pada penelitian ini untuk mengurangi frekuensi harmonik yang tidak diinginkan yang ditimbulkan dari pemancar sehingga efek interferensi frekuensi pada *adjacent channel* dapat dikurangi. Alat ini hanya akan melewatkan frekuensi yang diharapkan. Bandpass filter ini diatur sedemikian rupa sehingga dapat digunakan pada range frekuensi *VHF Air Ground Communication* yaitu 118 – 137 MHz dengan model *tunable combline* yang memiliki selektifitas tinggi pada channel frekuensi yang digunakan. Metode penelitian ini adalah perancangan dan analisis alat yang terdiri dari beberapa saluran transmisi batang silinder (*slabline*) yang terhubung ke *ground* pada salah satu ujungnya dan terpasang *variable capacitor* bersama dengan *ground* di bagian ujung yang lainnya. Hasil simulasi dan pengukuran parameter *insertion loss* (S_{21}) dan *return loss* (S_{11}) masih memenuhi standar perancangan pada semua range frekuensi VHF A/G. Kinerja peralatan diujicoba dengan frekuensi kerja 120,0 MHz pada peralatan pemancar radio VHF AG Merk Icom A-120 dengan daya 9 Watt, Merk Rohde & Swarch SU4200 dengan daya 5 Watt, serta Dittel FSG-2T dengan power output 3 Watt. Hasil uji coba pemakaian pada peralatan masih dapat digunakan dengan hasil VSWR masih kurang dari 2 dan penurunan power output kurang dari 20% dari power nominal.

Kata Kunci: VHF A/G, Bandpass Filter, Tunable, Comblines

Abstract: *Aviation radio communication services between Air Traffic Control and pilots must be maintained in good condition without interruption because flight safety is the main priority. The goal of the research is to reduce unwanted frequency harmonics generated from the transmitter so that the effect of frequency interference on adjacent channels can be reduced. This*

tool will only miss the expected frequency. This bandpass filter is set up carefully to be able used in the VHF Air Ground Communication frequency range, namely 118 – 137 MHz with a tunable combline model which has high selectivity in the frequency channel used. This research method is the design and analysis of a tool consisting of several cylindrical rod transmission lines (slabline) connected to ground at one end and a variable capacitor attached along with ground at the other end. The simulation results and measurements of insertion loss (S_{21}) and return loss (S_{11}) parameters still meet design standards in all VHF A/G frequency ranges. Equipment performance was tested with a working frequency of 120.0 MHz on VHF AG radio transmitter equipment Brand Icom A-120 with a power of 9 Watts, Brand Rohde & Swarch SU4200 with a power of 5 Watts, and Dittel FSG-2T with an output power of 3 Watts. Test results using the equipment can still be used with VSWR results still less than 2 and a decrease in power output of less than 20% of the nominal power.

Keyword: VHF A/G, Bandpass Filter, Tunable, Comblin

Pendahuluan

Layanan komunikasi penerbangan sebagai sarana untuk melakukan informasi antara pemandu lalu lintas (*Air Traffic Control*) dan penerbang (pilot) mutlak diperlukan pada sistem komunikasi penerbangan. Metode komunikasi pada Very High Frequency Air Ground Communication (VHF A/G) dilakukan secara bergantian menggunakan single frequency yang sering disebut dengan model simplex. VHF A/G bekerja pada frekuensi 118 MHz sampai dengan 136 MHz (*Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor : KP 103 Tahun 2015 Tentang Standar Teknis Dan Operasi (Manual Of Standard CASR 171-02) Spesifikasi Teknis Fasilitas Telekomunikasi Penerbangan, n.d.*).

Radio VHF A/G seperti yang diatur dalam *International Civil Aviation Organization* (ICAO) memiliki spesifikasi khusus (Icao, 2002) antara lain kestabilan frekuensi adalah $\pm 0.0001\%$ dari frekuensi yang digunakan. Keefektifan sinyal yang dapat diterima sebesar $\pm 0.0005\%$ dari *bandwidth* frekuensi yang digunakan.

Sedangkan faktor selektifitas juga sangat menentukan performa dari peralatan VHF A/G, sehingga radio pemancar pada *adjacent channel* harus mampu meredam *spurious* dan *harmonic* frekuensi sebesar 60 dB atau lebih. Pengaruh interferensi pada receiver yang ditimbulkan oleh radio pemancar dapat dikurangi dengan menambahkan sebuah perangkat *bandpass filter*.

Beberapa penelitian bandpass filter dilakukan oleh (Ayu & Oka, 2014) dengan merancang bandpass filter untuk diterapkan pada komunikasi VHF air to Ground di bandara Budiarto dengan menggunakan *lumped component* dan mampu menghasilkan *bandwidth* 4,7 KHz pada simulasinya. Sedangkan (Firmansyah et al., 2015) membuat Bandpass Filter untuk receiver dengan model *dual band cascade* pada frekuensi 119,7 Mhz dan 123,2 Mhz untuk perangkat tower set di bandara Budiarto dengan hasil simulasi pada frekuensi 119,7 MHz diperoleh *return loss* (S_{11}) sebesar -37,86 dB, *bandwidth* 19 kHz, *insertion loss* (S_{21}) -0,001, dan pada frekuensi 123,2 MHz diperoleh *return loss*

(S_{11}) sebesar -19,167 dB, *bandwidth* 16 kHz, *insertion loss* (S_{21}) -0,053. Penelitian yang dilakukan oleh (Arfiyan et al., 2022) adalah *narrow bandpass filter* menggunakan komponen *lumped* pada frekuensi 132,95 MHz di Bandara Hang Nadim, Batam menghasilkan *return loss* S_{11} -48,89 dB dan S_{21} -0,00027 dB. Sedangkan pada penelitian (Zakharov & Ilchenko, 2020) menggunakan model *stripline comblin* dan pada penelitian (Zeng et al., 2015) menggunakan *tunable lumped element. Bandpas Filter* dengan model *comblin* pada aplikasi satelit S Band, juga di teliti oleh (Rezaee & Memarian, 2021) dan (Anwar & Dhanyal, 2018). Berbeda dengan penelitian (Wibisono et al., 2021) bahwa *Bandpass filter* di rancangan secara bersamaan dengan LNA *dual band* pada aplikasi *radio aids navigation*. Analisis efektifitas tentang penggunaan *cavity filter* pada VHG A/G di bandara Cilacap juga pernah di teliti oleh (Kholistianingsih et al., 2022) dan pada interferensi VHF APP dan VHF ER di bandara Pekanbaru oleh (Sitopu & Cahyadi, 2022). Pada penelitian ini diusulkan *bandpass filter* dengan model *comblin* berbentuk batang silinder dengan diberikan *variable capacitor* pada salah satu ujungnya sehingga nantinya dihasilkan BPF yang *tunable* (dapat di tala) dan memenuhi standar pengoperasian berdasarkan kriteria yang berlaku.

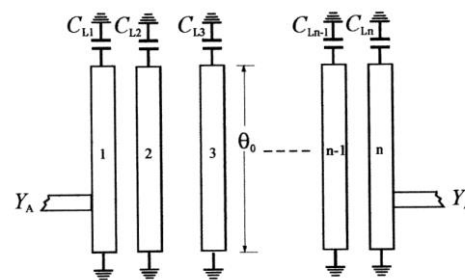
Metode

Metode penelitian yang digunakan dalam perancangan *bandpass filter comblin* adalah metode *Research and Development (R&D)* yang terbagi menjadi 2 kegiatan. Kegiatan pertama adalah melakukan penelitian dan studi literatur untuk menghasilkan rancangan produk, dan kegiatan kedua adalah pengembangan untuk menguji efektivitas, validitas rancangan yang telah dibuat sehingga menjadi produk yang teruji dan dapat

dimanfaatkan masyarakat luas (Sugiyono, 2018). Pada penelitian ini dilakukan perancangan secara matematis, sketsa rancangan, simulasi parameter, validasi pengukuran dan ujicoba peralatan pada skala laboratorium.

Bandpass Filter Comblin

Susunan rangkaian BPF *comblin* dalam bentuk *slabline* atau batang silinder ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini:



Gambar 1. Susunan Bandpass Filter Comblin (Hong & Lancaster, 2001)

Resonator filter ini terdiri atas elemen-elemen saluran transmisi (*transmission line*) mode TEM yang dihubungkan singkat pada salah satu ujungnya dengan *ground* dan dipasang kapasitor secara seri (C_L) diujung lainnya dengan *ground*. Saluran transmisi 1 sampai dengan n sepanjang yang dihubungkan dengan kapasitor $C_{L,1}$ s/d $C_{L,n}$ merupakan *resonator* berupa batang silinder dengan panjang sebesar (θ_0). Panjang resonator kurang lebih adalah $\lambda_{g0}/4$ pada saat resonansi (λ_{g0} adalah panjang gelombang pada frekuensi tengah). Panjang *resonator* dalam satuan derajat dilambangkan dengan θ , secara praktis biasanya pada sudut 30° dan 45° yang menghasilkan susunan kompak dan kerja stop-band yang baik (Jarry & Beneat, 2008). Panjang *resonator* dapat dihitung dengan rumus (Jarry & Beneat, 2008) :

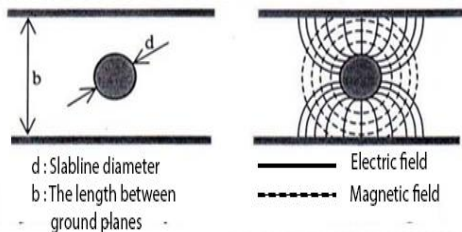
$$\theta_0 = \frac{\theta}{360^\circ} \times \frac{c}{f} \quad (1)$$

Kopling antara *resonator* tercapai melalui *fringing field* atau medan limpahan antara *resonator*. Pemberian kapasitor pada salah satu ujung silinder adalah beban reaktif maka pengaruh kopling magnetik dan kopling elektrik saling menghilangkan. Nilai kapasitor pada ujung silinder dapat dicari dengan rumus (Hong & Lancaster, 2001):

$$C.Li = YA \left(\frac{Yai}{YA} \right) \times \frac{\cot \theta_0}{\omega_0} \quad (2)$$

untuk $i = 1$ s/d n

Slabline adalah suatu saluran transmisi yang berbentuk batang logam silindris yang mempunyai mode penyaluran TEM (*Transverse Electro Magnetic*), yaitu mode penyaluran yang medan listrik dan medan magnetnya tegak lurus sumbu perambatan.



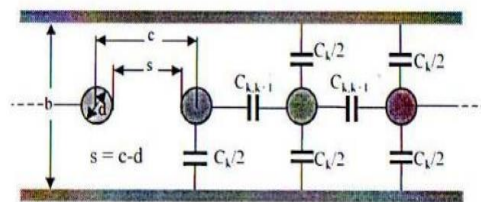
Gambar 2. Penampang silinder slabline dan garis medan

Karakteristik impedansi saluran silinder merupakan fungsi dari diameter dan Panjang antar *ground plane*, yang dapat dinyatakan dengan rumus :

$$Z_{cyl} = \frac{Z_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4}{\pi \frac{d}{b}}\right) \quad (3)$$

$Z_0 = 376,73 \Omega$, impedansi gelombang medium propagasi (*free space*).

Struktur *slabline resonator* penampang melintang dari struktur batang silinder yang digandeng sejajar diantara *ground-plane* yang dipergunakan untuk *bandpass filter combline* seperti terlihat pada gambar 3. Tiap saluran mempunyai batang silinder dengan diameter d , jarak antar pusat batang c , jarak antar permukaan batang silinder s , dan jarak antar *ground-plane* b . (G. Matthaei, E.M.T. Jones, 1980)



Gambar 3. Batang Silinder gandeng sejajar diantara ground-plane

Insertion Loss dan Return Loss

Parameter *bandpass filter* yang diukur adalah *insertion loss* dan *return loss*. Sebuah filter akan terjadi kehilangan daya akibat rugi rugi sisipan diantara sumber dan beban. Rugi rugi tersebut dalam bentuk perbandingan daya input (P_i) dan daya yang dipantulkan ($P_r = P_i |\Gamma|^2$), yang dinyatakan dalam formula rumus (Triprijooetomo & Supriyanto, 2016) :

$$PLR = \frac{P_i}{(1-|\Gamma|^2)P_i} = \frac{1}{(1-|\Gamma|^2)} \quad (4)$$

Jadi nilai *insertion loss* (S_{21}) adalah

$$IL = 10 \log PLR \text{ (dB)} \quad (5)$$

Sedangkan untuk nilai *return loss* (S_{11}) dapat dinyatakan dalam rumus :

$$RL = 20 \log \Gamma \text{ (dB)} \quad (6)$$

Dimana nilai koefisien refleksi (Γ), dapat ditentukan dengan rumus :

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o^+} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (7)$$

Sedangkan untuk mengetahui nilai *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) pada uji coba rancangan dapat ditentukan dengan perbandingan *forward power* dan *reflected power* (Pozar, 2011) persamaan untuk mengetahui nilai VSWR dapat dihitung dengan rumus (Wibisono et al., 2021):

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{\text{Reflected Power}}{\text{Forward Power}}}}{1 - \sqrt{\frac{\text{Reflected Power}}{\text{Forward Power}}}} \quad (8)$$

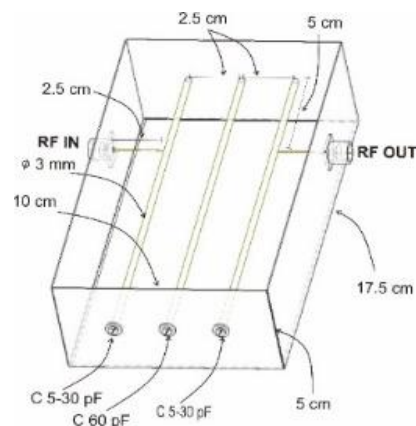
Tahapan Perancangan

Jenis *bandpass filter* yang dipilih adalah jenis *comblin*, karena bentuknya yang kecil berupa saluran *resonator* berupa batang silinder dan *variable capacitor* pada salah satu ujungnya yang dapat diatur *matching* impedansi. Usulan rancangan dibuat dengan 3 tingkatan yang memiliki 1 saluran *resonator* utama yang terletak di tengah dengan 2 *resonator* dibagian pinggir untuk *ditapping* sebagai input dan output saluran.

Penentuan bahan komponen yang digunakan berupa kawat kuning dengan diameter kawat 4 mm, serta *variable capacitor* sampai dengan 60pF. Sedangkan bahan *case body* digunakan bahan PCB dengan bahan substrat FR-4 yang dapat disesuaikan dimensinya. Panjang dan jarak silinder secara perhitungan matematis dapat dihitung frekuensi resonansi pada *range* frekuensi VHF A/G yang digunakan. Adapun perancangan ukuran detail silinder dan dimensi *case body* dari Bandpass Filter seperti pada tabel 1.

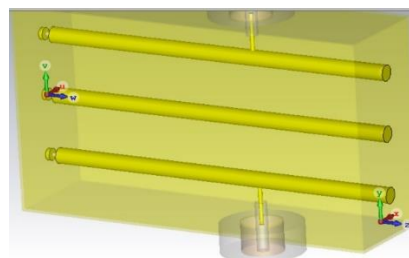
Tabel 1. Ukuran detail perancangan BPF Comblin

No	Parameters		Value
1	Case	Length	175 mm
		Width	100 mm
		Height	50 mm
2	Cylinder	Length	175 mm
		Diameter	3 mm
		Cyl to Cyl distance	25 mm
		Gap cylinder to case	5 mm
3	Variable Capacitor	Capacitance	5–60 pF



Gambar 4. Sketsa rancangan BPF

Pada tahapan desain produk, menggunakan *software* antenna *High Frequency*, untuk membuat sketsa perancangan seperti terlihat pada gambar 5 berikut :



Gambar 5. Sketsa rancangan BPF

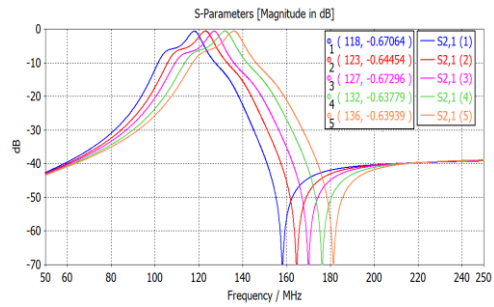
Pembahasan dan Diskusi

Pembahasan penelitian ini meliputi hasil yang diperoleh melalui simulasi, hasil fabrikasi, hasil yang diperoleh menggunakan alat ukur, uji coba produk serta perbandingan simulasi dan pengukuran. Pengaturan nilai kapasitor untuk mendapatkan posisi *matching* pada masing masing frekuensi terlihat pada tabel 2.

Tabel 2. Pengaturan nilai kapasitor pada simulasi BPF *Comblin*

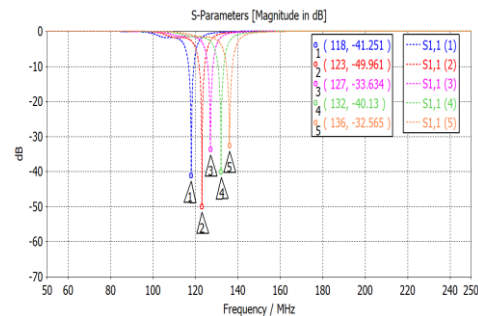
No	Frekuensi	Nama	Nilai
1	118,0 MHz	C1	29,2
		C2	22,7
		C3	20
2	123,0 MHz	C1	26,9
		C2	20,78
		C3	18,3
3	127,0 MHz	C1	25,6
		C2	19,35
		C3	16,7
4	132,0 MHz	C1	23,4
		C2	17,8
		C3	15,55
5	136,0 MHz	C1	22,0
		C2	16,67
		C3	14,5

Hasil simulasi *insertion loss* (S_{21}) untuk mengetahui seberapa besar daya yang bisa dilewatkan rangkaian *Bandpass Filter Comblin* pada 5 (lima) buah frekuensi sampel yaitu pada frekuensi: 118.0 MHz, 123.0 MHz, 127.0 MHz, 132.0 MHz dan 136.0 MHz berturut turut dihasilkan sebesar -0.670 dB, -0.644 dB, -0.672 dB, -0.637 dB, dan -0.639 dB seperti terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Simulasi S_{21}

Sedangkan hasil simulasi *return loss* (S_{11}) untuk mengetahui seberapa besar daya yang dipantulkan pada frekuensi sampel 118.0 MHz, 123.0 MHz, 127.0 MHz, 132.0 MHz dan 136.0 MHz berturut turut didapatkan nilai sebesar -41.251 dB, -49.961 dB, -33.634 dB, -40.130 dB, -32.565 dB seperti terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Simulasi S_{11}

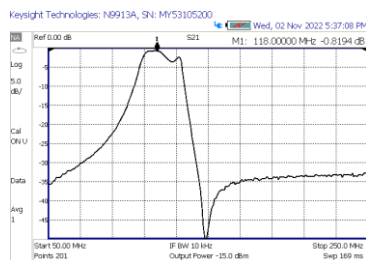
Pada tahapan selanjutnya rangkaian dipabrikasi, terdiri dari 3 buah kawat silinder yang dipasang pada *casing box* dan ujung dari kawat silinder tersebut diberikan sebuah *variable capacitor* untuk pengaturan *matching* pada frekuensi yang diinginkan. Gambar bagian dalam susunan silinder dapat terlihat pada gambar 8.

Rancang Bangun Tunable Bandpass Filter Comblin Untuk VHF Air Ground Radio Communication



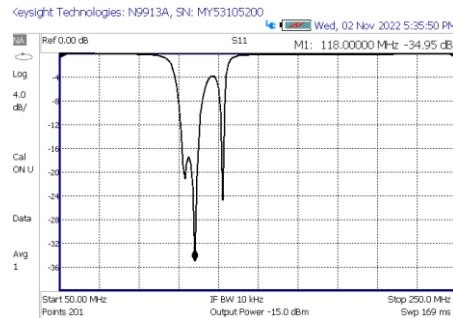
Gambar 8. Fabrikasi *BPF Comblin*

Hasil pengukuran pada peralatan Bandpass Filter comblin yang telah dipabrikasi menunjukkan parameter *insertion loss* (S_{21}) pada frekuensi 118,0 MHz adalah -0.8194 dB seperti tampak pada gambar 9.



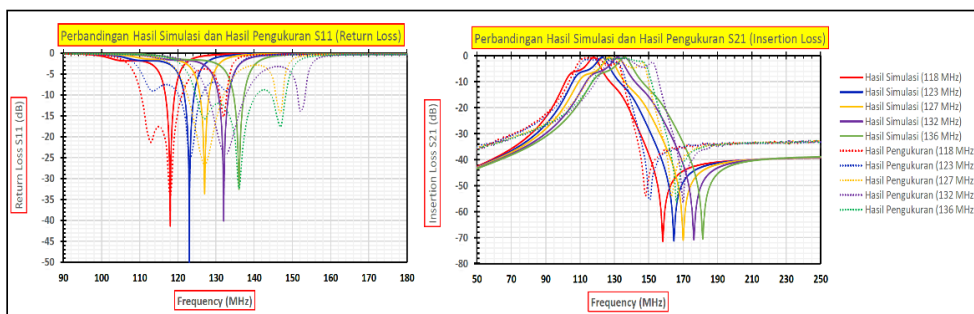
Gambar 9. Pengukuran *Insertion Loss* (S_{21}) pada freq 118,0 MHz

Sedangkan parameter *return loss* (S_{11}) pada frequency 118,0 MHz didapatkan nilai -34.95 dB terlihat pada gambar 10.



Gambar 10. Pengukuran *Return Loss* (S_{11}) pada freq 118,0 MHz

Secara lengkap perbandingan antara hasil simulasi dan pengukuran parameter *insertion loss* (S_{21}) dan *return loss* (S_{11}) pada frekuensi sampel 118,0 MHz, 123,0 MHz, 127,0 MHz, 132,0 MHz dan 136,0 MHz dapat terlihat pada gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan Hasil simulasi dan pengukuran *BPF Comblin*

Data hasil simulasi dan hasil pengukuran parameter S_{21} dan S_{11} pada range frekuensi sampel 118,0 MHz – 136,0 MHz menunjukkan bahwa peralatan *BPF Comblin* yang

dirancang memiliki karakteristik yang hampir sama antara simulasi dan pabrikan serta masih memenuhi spesifikasi perancangan yang telah ditetapkan.

Tabel.3 Hasil dan kriteria perancangan

Parameter / Frekuensi kerja	Hasil Simulasi	Hasil Pengukuran	Kriteria	Ket
Return Loss (S_{11})				
118,0 MHz	-41,251 dB	-34,95 dB	≤ -20 dB	Memenuhi
123,0 MHz	-49,961 dB	-25,61 dB	≤ -20 dB	Memenuhi
127,0 MHz	-33,634 dB	-26,78 dB	≤ -20 dB	Memenuhi
132,0 MHz	-40,130 dB	-24,04 dB	≤ -20 dB	Memenuhi
136,0 MHz	-32,565 dB	-32,35 dB	≤ -20 dB	Memenuhi
Insertion loss (S_{21})				
118,0 MHz	-0,670 dB	-0,8194 dB	≥ -1 dB	Memenuhi
123,0 MHz	-0,644 dB	-0,9239 dB,	≥ -1 dB	Memenuhi
127,0 MHz	-0,672 dB	-0,8602 dB	≥ -1 dB	Memenuhi
132,0 MHz	-0,637 dB	-0,8969 dB	≥ -1 dB	Memenuhi
136,0 MHz	-0,639 dB	-0,9484 dB	≥ -1 dB	Memenuhi

Rancangan *Bandpass Filter Comblin* diujicobakan pada peralatan pemancar VHF A/G merk Icom seri A-120 dengan daya pancar 10 Watt, pemancar VHF A/G merk Rohde & Swarch seri 4200 dengan daya pancar (*low*) 5 Watt, serta VHF A/G merk Dittel seri FSG 2T dengan daya output pemancar 3 Watt, seperti terlihat pada gambar 12. Ujicoba pemakaian dilakukan dengan 2 cara yaitu pengukuran *Forward* dan *Reflected Power* pada jalur RF sebelum dan setelah alat bandpass filter *comblin* dipasang pada pemancar VHF A/G yang selanjutnya dihitung nilai VSWR hasil pengukuran.



Gambar 12. Ujicoba Peralatan

Data hasil pengukuran pada *Forward Power*, *Reflected Power* dan VSWR pada sampel frekuensi kerja 120.0 MHz baik sebelum dan sesudah pemasangan *BPF Comblin* seperti terlihat dalam tabel 4.

Tabel 4. Tabulasi hasil pengukuran daya dan VSWR pada ujicoba peralatan

Merk VHF-AG	Sebelum Bandpass Cavity Filter			Setelah Bandpass Cavity Filter			Penurunan daya pancar	
	Fwd (watt)	Refl (watt)	SWR	Fwd (watt)	Refl (watt)	SWR	watt	Persen (%)
Icom-A120	9.8	0.06	1.16	8	0.06	1.18	1.8	18.3 %
R&S-4200	5.5	0.08	1.27	4.5	0.1	1.30	1	18.1 %
Dittel- FSG2T	3	0.08	1.39	2.5	0.08	1.43	0.5	18.6 %

Hasil pengukuran pada ujicoba peralatan di laboratorium, menunjukkan bahwa terjadi penurunan daya / *power output* rata rata masih di bawah 20%, dan nilai VSWR tidak melebihi dari 2. Hal ini sesuai dengan kriteria perancangan dan masih cukup baik untuk digunakan pada operasional penggunaan rancangan *bandpass filter comblin*.

Kesimpulan

Berdasarkan kondisi yang ada maka diperoleh kesimpulan bahwa produk peralatan *bandpass filter comblin* untuk peralatan VHF Air Ground Radio Communication yang telah dirancang sedemikian rupa dicapai hasil pengukuran pada sampel frekuensi 118.0 MHz, 123.0 MHz, 127.0 MHz, 132.0 MHz dan 136.0 MHz berturut turut nilai *insertion loss* (S_{21}): -0.8194 dB, -0.9239 dB, -0.8602 dB, -0.8969 dB dan -0.9484 dB dan *return loss* (S_{11}) : -34.95 dB, -25.61 dB, -26.78 dB, -24.04 dB, dan -32.35 dB. Hal ini cukup baik dan masih memenuhi spesifikasi rancangan dari target ambang batas ≤ -20 dB pada S_{11} dan ≥ -1 dB pada S_{21} . Pada saat ujicoba pemakaian produk pada pemancar VHF A/G merk Icom A-120, R&S 4200, dan Dittel FSG-2T pada frekuensi kerja 120 MHz didapatkan nilai VSWR masih dibawah

2 serta terjadi penurunan daya kurang dari 20% dari power normal. Ini berarti peralatan *bandpass filter comblin* berhasil digunakan pada ujicoba pemakaian produk.

Daftar Pustaka

- Anwar, M. S., & Dhanyal, H. R. (2018). Design of S-band comblin coaxial cavity bandpass filter. *2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 866–869. <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2018.8312328>
- Arfiyan, S., Wildan, M., & Arnas, Y. (2022). Rancangan Narrow Width Bandpass Filter dengan Chebyshev Orde III untuk Receiver VHF Air Ground Radio Communication di Bandara Internasional Hang Nadim Batam. *01(01)*, 2–9.
- Ayu, I., & Oka, M. (2014). Rancangan Band Pass Filter Pada Komunikasi VHF Air To Ground di Bandara Budiarto dengan menggunakan Komponen Lumped Orde Tiga. *National Conference on Industrial Electrical and Electronics (NCIEE) Proceedings*, 3, 116–120.
- Firmansyah, T., Harsojo, D., Fatonah, F., Aziz, A., & Banten, T. (2015). Rancangan Dual Band Cascode Band Pass Filter untuk Perangkat Tower Set Bandara Budiarto. *4(1)*, 12–17.
- G. Matthaei, E.M.T. Jones, L. Y. (1980). *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. Artech House.
- Hong, J., & Lancaster, M. J. (2001). *Microstrip Filters for RF / Microwave*

- (Vol. 7). John Wiley & Sons. Inc.
- Icao. (2002). Aeronautical Telecommunications. *Volume II, October 2001*, 3–14.
- Jarry, P., & Beneat, J. (2008). *Advanced Design Techniques and Realizations of Microwave and RF Filters*. Wiley-IEEE Press. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5236479>
- Kholistianingsih, Sudaryanto, E., & Maulana, M. I. (2022). Analisis Efektivitas Penggunaan Peralatan VHF- A/G yang dilengkapi dengan Cavity Filter di Perum LPPNPI KCP Cilacap. *TEODOLITA : Media Komunikasi Ilmiah Dibidang Teknik*, 23(2), 96–113. <https://doi.org/10.53810/jt.v23i2.462>
- Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor : KP 103 Tahun 2015 Tentang Standar Teknis dan Operasi (Manual Of Standard CASR 171-02) Spesifikasi Teknis Fasilitas Telekomunikasi Penerbangan. (n.d.).
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering* (4th ed.). Wiley.
- Rezaee, S., & Memarian, M. (2021). A Compact Microstrip Compline Filter for Microwave S-band. *2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 891–894. <https://doi.org/10.1109/ICEE52715.2021.9544407>
- Sitopu, M. widasari, & Cahyadi, C. I. (2022). Perbaikan Interferensi Gelombang RF antara VHF APP dan VHF ER Menggunakan Cavity Filter (Studi Kasus Bandara Sultan Syarif Kasim II Pekanbaru). *Jurnal Penelitian Politeknik Penerbangan Surabaya*, 7(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.46491/jp.v7i3.1150>
- Sugiyono. (2018). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Alfabeta.
- Triprijooetomo, T., & Supriyanto, T. (2016). Perancangan Wideband Band Pass Filter (BPF) dengan Metamaterial Mikrostrip Frekuensi 1,78 GHz – 3,38 GHz. *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 4(1), 18. <https://doi.org/10.36055/setrum.v4i1.461>
- Wibisono, G., Wildan, M., Wahyudi, J., Widoro, E., & Firmansyah, T. (2021). Co-design Structure of Dual-Band LNA and Dual-Band BPF for Radio Navigation Aid Application. *Wireless Personal Communications*, 116. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07754-9>
- Zakharov, A., & Ilchenko, M. (2020). Coupling Coefficients Between Resonators in Stripline Compline and Pseudocompline Bandpass Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68(7), 2679–2690. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2988866>
- Zeng, K., Psychogiou, D., & Peroulis, D. (2015). A VHF tunable lumped-element filter with mixed electric-magnetic couplings. *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WAMICON.2015.7120421>