



## Desain dan Simulasi *High Pass Filter* Menggunakan *Genesys* dan *Altium Designer* untuk Implementasi PCB

Queen Hesti Ramadhany<sup>1</sup>, Hafizh Qisthi Bakri<sup>1</sup>, Refki Budiman<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitas Andalas, Limau Manih, Padang, 25163, Indonesia

### ARTICLE INFORMATION

Diajukan: 25 Mei 2026  
Revisi: 29 Mei 2026  
Diterbitkan : 01 Juni 2026

### KEYWORDS

HPF, *Genesys*, *Altium Designer*, PCB, *Komunikasi Microwave*

### CORRESPONDENCE

Phone: +62 821 1738 5054  
E-mail: [queenhesti@eng.unand.ac.id](mailto:queenhesti@eng.unand.ac.id)

### A B S T R A C T

*High Pass Filter* (HPF) merupakan komponen penting dalam sistem komunikasi frekuensi radio dan gelombang mikro, terutama dalam aplikasi *Low Noise Amplifier* (LNA) yang digunakan pada sistem *Radio Detection and Ranging* (RADAR). Kinerja sistem komunikasi *Radio Frequency* (RF) sangat dipengaruhi oleh karakteristik filter, khususnya *insertion loss* dan *return loss*. Penelitian ini memaparkan desain dan simulasi *Butterworth High Pass Filter* menggunakan perangkat lunak *Genesys* serta implementasi *Printed Circuit Board* (PCB) dengan *Altium Designer*. Filter ini dirancang dengan frekuensi *cutoff* 1062 MHz dan frekuensi *pass* 1090 MHz. Proses simulasi dilakukan melalui konfigurasi topologi filter, optimasi respons, dan realisasi PCB menggunakan implementasi *microstrip*. Hasil menunjukkan bahwa filter yang diusulkan mencapai karakteristik kerugian pantulan dan kerugian insersi yang dapat diterima setelah optimasi. Selain itu, implementasi PCB menggunakan *Altium Designer* mempertahankan kinerja respons yang stabil tanpa degradasi yang signifikan. Pendekatan yang diusulkan ini memberikan implementasi filter RF yang lebih praktis dengan mengintegrasikan proses simulasi dan realisasi PCB.

### PENDAHULUAN

Sistem komunikasi *Radio Frequency* (RF) dan gelombang mikro terus berkembang pesat dalam teknologi telekomunikasi modern. Aplikasi seperti sistem *Radio Detection and Ranging* (RADAR), komunikasi nirkabel, komunikasi satelit, dan sistem transmisi RF memerlukan komponen pemrosesan sinyal yang stabil dan efisien untuk menjaga kualitas komunikasi serta mengurangi gangguan. Salah satu komponen penting yang digunakan dalam sistem RF adalah rangkaian filter [1]. Filter digunakan untuk mengontrol frekuensi sinyal, menekan frekuensi yang tidak diinginkan, dan meningkatkan kualitas sinyal dalam sistem komunikasi [2][3]. Di antara berbagai jenis filter, salah satunya adalah *High Pass Filter* (HPF) banyak digunakan dalam aplikasi RF dan gelombang mikro karena filter ini memungkinkan sinyal di atas frekuensi potong tertentu untuk melewati sementara meredam sinyal dengan frekuensi lebih rendah [4]. Dalam sistem RADAR, HPF umumnya diimplementasikan sebagai bagian dari subsistem *Low Noise Amplifier* (LNA) untuk mengurangi kebisingan yang tidak diinginkan sebelum penguatan sinyal [5]-[7]. Oleh karena itu, kinerja HPF secara langsung memengaruhi sensitivitas penerima dan kinerja komunikasi secara keseluruhan.

Perancangan filter RF memerlukan pertimbangan cermat terhadap beberapa parameter penting, termasuk frekuensi *cutoff*, kerugian insersi, kerugian pantulan, pencocokan impedansi, dan realisasi komponen. Metode perhitungan manual konvensional sering kali memerlukan perhitungan berulang dan proses optimasi yang memakan waktu, terutama ketika spesifikasi filter menjadi lebih kompleks. Dalam praktik rekayasa RF, perangkat lunak simulasi banyak digunakan untuk menyederhanakan proses perancangan dan meningkatkan efisiensi perancangan. *Genesys* adalah salah satu aplikasi perangkat lunak simulasi yang umum digunakan dalam perancangan sirkuit RF dan gelombang mikro [8][9]. Perangkat lunak ini menyediakan fitur estimasi urutan filter otomatis, perhitungan nilai komponen, analisis respons, dan optimasi. Kemampuan ini menyederhanakan proses desain filter dan mengurangi kompleksitas perhitungan manual. Selain itu, *Genesys* memungkinkan perancang untuk menganalisis respons parameter-S seperti kerugian penyisipan (S<sub>21</sub>) dan kerugian pantulan (S<sub>11</sub>), yang merupakan parameter penting dalam evaluasi sirkuit RF.

Selain simulasi, realisasi *Printed Circuit Board* (PCB) juga memainkan peran penting dalam implementasi filter RF. Desain tata letak PCB yang tidak tepat dapat sangat memengaruhi kinerja filter karena sinyal RF sangat sensitif terhadap konfigurasi tata letak, jalur

transmisi, dan penempatan komponen. Oleh karena itu, implementasi PCB memerlukan perangkat lunak yang tepat yang mampu mendukung desain tata letak RF. *Altium Designer* banyak digunakan untuk pembuatan skema dan implementasi tata letak PCB karena menyediakan kemampuan visualisasi PCB dan konfigurasi microstrip yang canggih [10]. Beberapa studi sebelumnya telah membahas desain filter RF dan gelombang mikro menggunakan pendekatan dan perangkat lunak simulasi yang berbeda. Pada buku [11], membahas rekayasa gelombang mikro dan implementasi filter mikrostrip untuk sistem RF dengan penekanan pada analisis teoretis dan karakteristik gelombang mikro. Penelitian lain juga meneliti implementasi filter mikrostrip untuk sistem komunikasi gelombang mikro dan menunjukkan kinerja filter yang baik menggunakan struktur mikrostrip yang ringkas. Namun, banyak studi sebelumnya berfokus terutama pada analisis simulasi tanpa memberikan proses realisasi PCB yang terperinci. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan simulasi HPF *Butterworth* menggunakan perangkat lunak *Genesys* serta realisasi PCB yang didesain dengan menggunakan *Altium Designer*. Rancangan yang diusulkan dievaluasi berdasarkan karakteristik kerugian penyisipan dan kerugian pantulan. Selain itu, penelitian ini memaparkan tahapan implementasi PCB secara terperinci untuk menunjukkan pendekatan yang lebih praktis dalam merealisasikan filter RF.

## METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap yang meliputi penentuan spesifikasi filter, simulasi filter, optimasi respons, dan realisasi *Printed Circuit Board* (PCB). Filter yang dirancang dalam penelitian ini adalah *High Pass Filter* (HPF) *Butterworth* karena respons *Butterworth* memberikan karakteristik yang sangat datar di wilayah *passband*, yang sesuai untuk sistem komunikasi *Radio Frequency* (RF) [12]. Spesifikasi filter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi frekuensi *cutoff* 1062 MHz dan frekuensi *pass* 1090 MHz. Atenuasi *passband* dirancang dalam kisaran 0 dB hingga -1 dB, sedangkan atenuasi *stopband* pada frekuensi harmonik kedua 545 MHz ditargetkan di bawah -40 dB. Spesifikasi ini dipilih untuk memenuhi persyaratan aplikasi penerima RF. HPF yang diusulkan ini dirancang untuk sistem komunikasi RF, khususnya untuk aplikasi penerima Radio Detection and Ranging (RADAR) yang membutuhkan transmisi sinyal yang stabil serta penekanan gangguan frekuensi rendah yang tidak diinginkan. Dalam sistem RADAR, filter biasanya diintegrasikan dengan sirkuit *Low Noise Amplifier* (LNA) untuk meningkatkan kualitas sinyal sebelum tahap amplifikasi. Penggunaan HPF dalam sistem penerima RF sangat penting karena komponen frekuensi rendah yang tidak diinginkan dan kebisingan dapat secara signifikan mengurangi sensitivitas penerima dan kinerja komunikasi secara keseluruhan [4].

### *High Pass Filter*

HPF adalah filter elektronik yang meneruskan sinyal di atas frekuensi *cutoff* tertentu sambil melemahkan sinyal frekuensi yang lebih rendah [13]. Dalam sistem komunikasi gelombang mikro, sirkuit HPF banyak digunakan untuk menjaga selektivitas sinyal dan mengurangi gangguan yang dihasilkan dari komponen noise frekuensi rendah [14]. Kinerja filter RF umumnya dievaluasi menggunakan beberapa parameter penting, termasuk frekuensi *cutoff*, *insertion loss*, *return loss*, *bandwidth*, dan karakteristik pencocokan impedansi. Dalam penelitian ini, respons filter *Butterworth* dipilih karena topologi *Butterworth* memberikan respons yang sangat datar di wilayah pita lewat dan menghasilkan karakteristik transmisi sinyal yang stabil [12][15]. Dibandingkan dengan respons filter lain seperti filter *Chebyshev* dan *Elliptic*, respons *Butterworth* menawarkan perilaku sinyal yang lebih halus dengan riak minimal di pita lewat, sehingga cocok untuk aplikasi penerima RF yang membutuhkan kualitas sinyal yang stabil. Beberapa studi melaporkan bahwa filter RF berbasis *Butterworth* tetap banyak digunakan dalam sistem komunikasi gelombang mikro karena respons frekuensinya yang stabil dan proses implementasinya yang lebih sederhana.

Spesifikasi ini dipilih untuk memastikan bahwa filter secara efektif menekan sinyal yang tidak diinginkan sambil mempertahankan transmisi sinyal yang stabil dalam rentang frekuensi operasi yang diinginkan. Desain filter *Butterworth* yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti fungsi transfer standar pada (1).

$$H(s) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^{2n}}} \quad (1)$$

di mana  $H(s)$  mewakili besarnya fungsi transfer,  $\omega_c$  adalah frekuensi sudut *cutoff*,  $\omega$  adalah frekuensi sudut operasi, dan  $n$  adalah orde filter [11]. Respons *Butterworth* ditandai dengan pita lewat yang halus tanpa riak, yang menguntungkan untuk menjaga integritas sinyal dalam sistem komunikasi RF. Orde filter diperkirakan secara otomatis menggunakan *Genesys* berdasarkan persyaratan atenuasi dan frekuensi yang ditentukan. Dalam desain filter gelombang mikro, penentuan orde filter penting karena memengaruhi selektivitas, kerugian penyisipan, dan kompleksitas implementasi. Orde filter yang lebih tinggi umumnya meningkatkan selektivitas tetapi meningkatkan kompleksitas sirkuit dan *loss* implementasi. Parameter *insertion loss*, yang umumnya diwakili oleh  $S_{21}$ , digunakan untuk mengevaluasi kinerja transmisi sinyal dari HPF yang diusulkan. *Insertion loss* dapat dinyatakan sebagai (2).

$$InsertionLoss = -20 \log_{10} |S_{21}| \quad (2)$$

di mana  $S_{21}$  mewakili koefisien transmisi maju filter. *Insertion loss* yang lebih rendah menandakan kemampuan transmisi sinyal yang lebih baik di dalam wilayah pita lewat. Parameter kerugian pantulan, yang dilambangkan dengan  $S_{11}$ , juga dianalisis untuk mengevaluasi kinerja pencocokan impedansi. *Return loss* dinyatakan sebagai (3).

$$\text{returnLoss} = -20 \log_{10} |S_{11}| \quad (2)$$

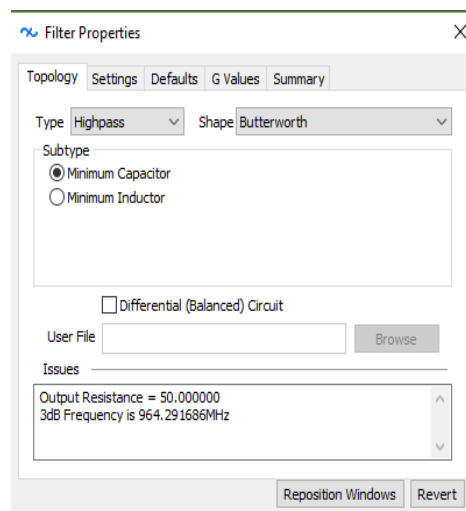
di mana  $S_{11}$  mewakili koefisien sinyal pantulan. Nilai *return loss* di bawah -10 dB umumnya menunjukkan pencocokan impedansi yang dapat diterima untuk sistem komunikasi RF. Proses simulasi dilakukan menggunakan *Genesys* karena perangkat lunak ini menyediakan fitur sintesis filter otomatis, optimasi, dan analisis parameter-S. Pertama, spesifikasi filter dimasukkan ke dalam menu konfigurasi *Filter Properties*. Perangkat lunak kemudian menghasilkan topologi filter awal dan memperkirakan nilai komponen yang diperlukan. Karakteristik respons awal dianalisis berdasarkan kinerja *insertion loss* dan *return loss*.

Setelah memperoleh respons awal, dilakukan optimasi untuk meningkatkan karakteristik filter. Proses optimasi tersebut mencakup penyesuaian faktor kualitas, modifikasi nilai komponen, dan penyetelan respons sesuai dengan komponen RF yang tersedia di pasaran. Beberapa penelitian terbaru melaporkan bahwa proses optimasi sangat penting dalam perancangan filter gelombang mikro karena toleransi komponen yang ada di lapangan dapat secara signifikan memengaruhi kinerja filter selama tahap implementasi [12]. Setelah tahap optimasi, rangkaian filter diimplementasikan ke dalam tata letak PCB menggunakan *Altium Designer*. Realisasi PCB merupakan tahap penting dalam implementasi filter RF karena konfigurasi PCB sangat memengaruhi karakteristik propagasi sinyal. Penempatan komponen dan konfigurasi saluran transmisi yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidaksesuaian impedansi dan pantulan sinyal yang tidak diinginkan.

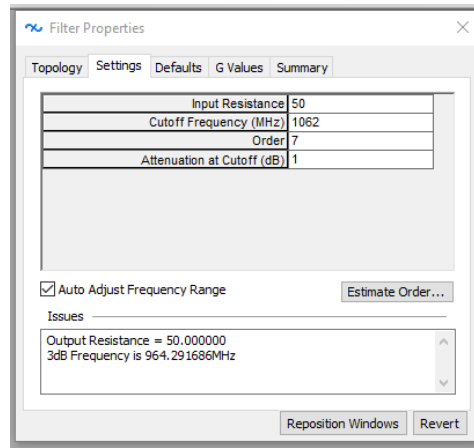
Proses perancangan PCB mencakup konversi skema, konfigurasi *footprint*, penyisipan jalur transmisi microstrip, dan pengaturan lapisan. Jalur transmisi microstrip dipilih karena banyak digunakan dalam sistem komunikasi gelombang mikro berkat strukturnya yang ringkas dan kemudahan pembuatannya. Impedansi karakteristik jalur *microstrip* dirancang untuk menjaga stabilitas transmisi sinyal RF selama implementasi PCB. Konfigurasi PCB akhir terdiri dari struktur lapisan atas, lapisan bawah, dan lapisan mekanis. Desain yang diusulkan kemudian dievaluasi berdasarkan karakteristik kerugian penyisipan dan kerugian pantulan yang diperoleh dari analisis simulasi. Hasil simulasi setelah implementasi PCB dibandingkan dengan studi sebelumnya untuk mengevaluasi keefektifan pendekatan yang diusulkan dalam sistem komunikasi RF dan gelombang mikro.

## HASIL

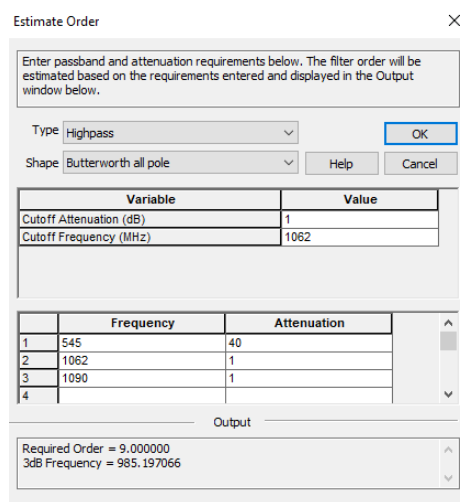
Desain HPF Butterworth yang diusulkan telah berhasil dilakukan menggunakan *Genesys* berdasarkan persyaratan komunikasi RF yang ditentukan. Topologi filter awal yang dihasilkan oleh perangkat lunak tersebut ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan konfigurasi spesifikasi filter ditunjukkan pada Gambar 2. Konfigurasi tersebut mencakup parameter frekuensi cutoff, frekuensi pass, atenuasi passband, dan atenuasi stopband yang diperlukan untuk aplikasi penerima RADAR. Berdasarkan spesifikasi ini, *Genesys* secara otomatis memperkirakan urutan filter dan menghasilkan nilai komponen yang sesuai, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3. Proses sintesis otomatis ini menyederhanakan prosedur desain filter dan mengurangi kompleksitas perhitungan manual yang umumnya ditemui dalam pengembangan filter RF.



Gambar 1. Topologi awal dari perancangan filter

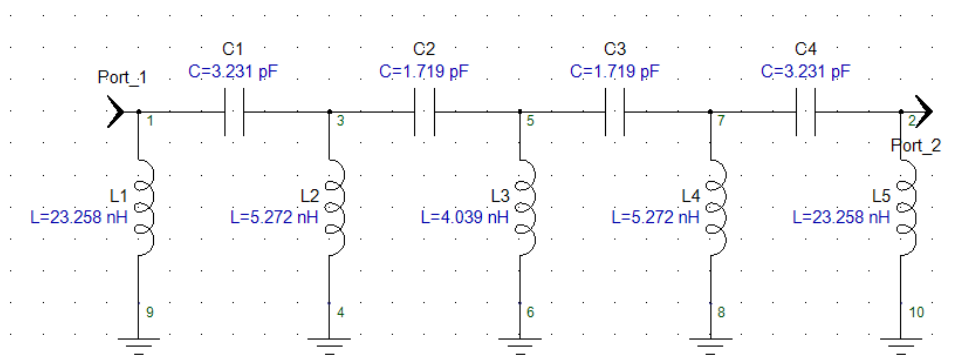


Gambar 2. Konfigurasi spesifikasi filter

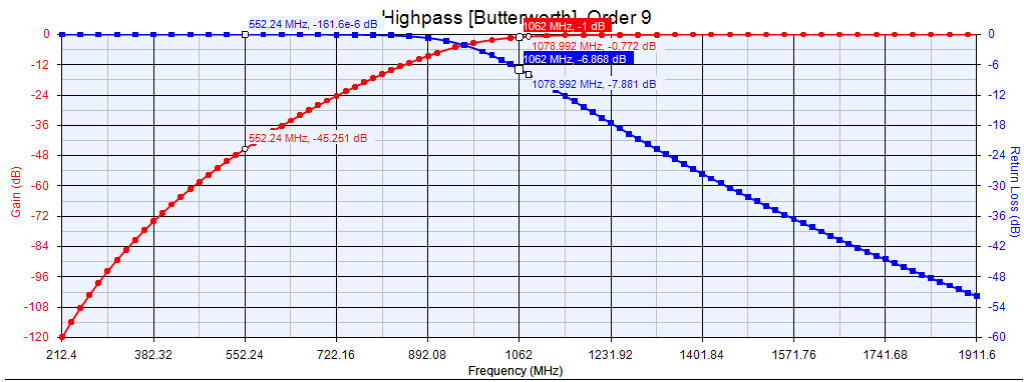


Gambar 3. Memperkirakan urutan filter yang dilakukan oleh Genesys

Respon simulasi awal dari HPF yang diusulkan ditampilkan pada Gambar 4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa karakteristik kerugian pantulan awal belum sepenuhnya memenuhi spesifikasi yang diinginkan karena respon S11 masih lebih tinggi dari  $-10$  dB di beberapa rentang frekuensi. Selain itu, respon kerugian penyisipan menunjukkan bahwa diperlukan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja transmisi sinyal di dalam rentang frekuensi passband. Oleh karena itu, optimasi dilakukan melalui penyesuaian nilai komponen dan modifikasi faktor kualitas sesuai dengan komponen RF yang tersedia di pasaran. Respons filter yang telah dioptimalkan yang diperoleh setelah proses penyetelan ditunjukkan pada Gambar 5. Optimasi tersebut secara signifikan meningkatkan karakteristik respons secara keseluruhan, terutama dalam hal kinerja kerugian penyisipan dan kerugian pantulan.

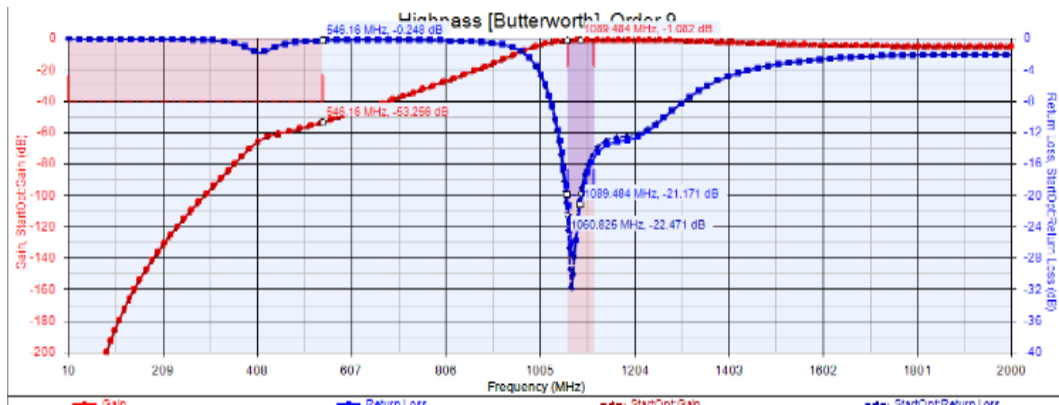


Gambar 4. Respon awal simulasi HPF



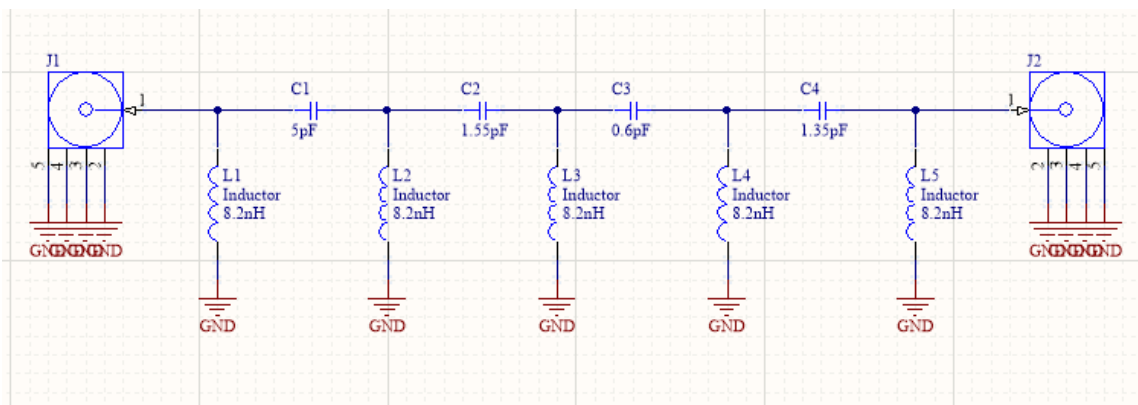
Gambar 5. Respon filter setelah dioptimalkan

Perbandingan antara respons awal dan respons yang telah dioptimalkan ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan hasil yang diperoleh, respons kerugian penyisipan ( $S_{21}$ ) yang telah dioptimalkan berhasil mencapai atenuasi mendekati 0 dB di dalam wilayah pita lewat, yang menunjukkan bahwa filter tersebut secara efektif mentransmisikan sinyal di atas frekuensi potong. Sementara itu, respons kerugian pantulan ( $S_{11}$ ) yang dioptimalkan mencapai nilai di bawah  $-10$  dB, yang menunjukkan kinerja pencocokan impedansi yang dapat diterima untuk sistem komunikasi RF. Hasil ini menunjukkan bahwa HPF Butterworth yang diusulkan berhasil memenuhi spesifikasi yang diperlukan untuk aplikasi penerima gelombang mikro. Selain itu, respons stabil yang diperoleh dari tahap optimalisasi menunjukkan bahwa topologi Butterworth yang dipilih cocok untuk menjaga stabilitas sinyal dalam sistem RF.



Gambar 6. Perbandingan respon

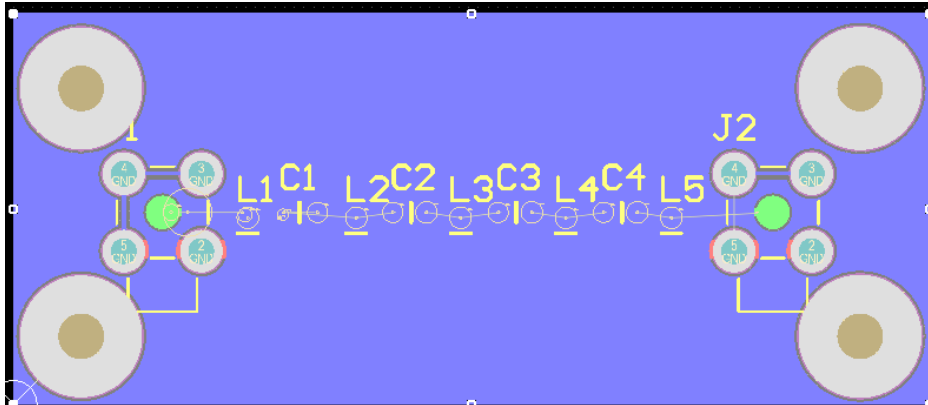
Setelah tahap optimasi, filter yang diusulkan diimplementasikan ke dalam tata letak PCB menggunakan Altium Designer. Proses konversi skema di Altium Designer ditampilkan pada Gambar 7, sedangkan implementasi lapisan atas dan bawah PCB ditunjukkan masing-masing pada Gambar 8 dan Gambar 9. Tata letak PCB dirancang menggunakan jalur transmisi microstrip untuk menjaga propagasi sinyal RF yang stabil dan meminimalkan ketidakcocokan impedansi selama transmisi sinyal. Selain itu, konfigurasi PCB secara keseluruhan dan susunan lapisan mekanis ditampilkan pada Gambar 10. Penempatan komponen yang tepat, konfigurasi jalur transmisi, dan optimasi perutean dipertimbangkan dengan cermat selama tahap realisasi PCB untuk mengurangi pantulan sinyal yang tidak diinginkan dan menjaga kinerja filter yang stabil.



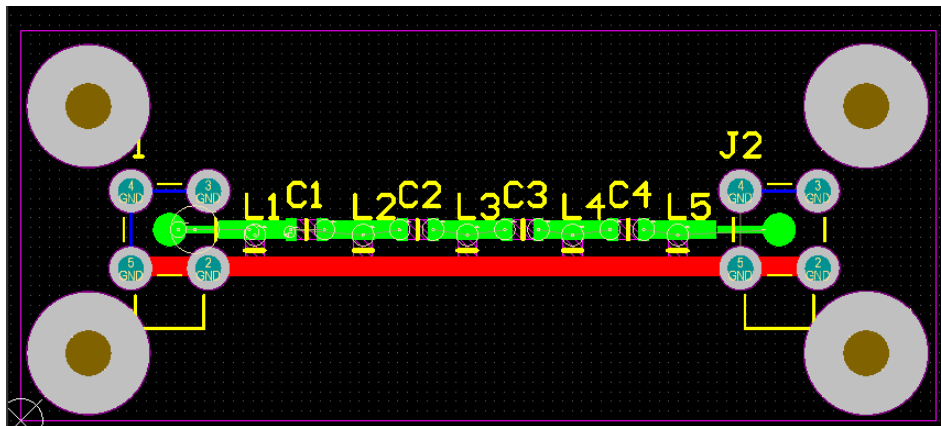
Gambar 7. Skema filter di Altium Designer



Gambar 8. Implementasi lapisan atas PCB pada *Altium Designer*



Gambar 9. Implementasi lapisan bawah PCB pada *Altium Designer*



Gambar 10. Konfigurasi PCB secara keseluruhan dan susunan lapisan mekanisme

Hasil implementasi akhir menunjukkan bahwa karakteristik respons tetap relatif stabil setelah realisasi PCB dan pemasangan mikrostrip. Perbandingan antara hasil simulasi dan implementasi PCB ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konfigurasi PCB yang diusulkan berhasil mempertahankan karakteristik kerugian insersi dan kerugian pantulan tanpa penurunan yang signifikan. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang terutama berfokus pada analisis simulasi saja [3], penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih praktis dan terintegrasi dengan menggabungkan tahap simulasi RF dan realisasi PCB. Integrasi antara Genesys dan Altium Designer menyederhanakan transisi dari tahap simulasi ke tahap implementasi serta meningkatkan efisiensi pengembangan filter RF untuk sistem komunikasi gelombang mikro.

## KESIMPULAN

Perancangan dan simulasi HPF *Butterworth* menggunakan *Genesys* telah berhasil dilakukan sesuai dengan persyaratan komunikasi RF yang ditetapkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa filter yang diusulkan mencapai karakteristik kerugian penyisipan dan kerugian pantulan yang memuaskan setelah proses optimasi, yang menandakan transmisi sinyal yang stabil dan kinerja pencocokan impedansi yang dapat diterima. Selain itu, implementasi filter ke dalam tata letak PCB menggunakan *Altium Designer* mempertahankan karakteristik respons yang stabil tanpa penurunan yang signifikan setelah penyisipan mikrostrip dan konfigurasi lapisan. Dibandingkan dengan studi sebelumnya, pendekatan yang diusulkan ini menyediakan proses pengembangan filter RF yang lebih praktis dan terintegrasi

dengan menggabungkan simulasi, optimasi, dan realisasi PCB dalam satu alur kerja. Oleh karena itu, integrasi *Genesys* dan *Altium Designer* dapat dianggap efektif untuk desain filter RF dan implementasi PCB gelombang mikro dalam sistem telekomunikasi.

## REFERENSI

- [1] Charles E. Free and Colin S. Aitchison, "RF Filters in RF and Microwave Circuit Design: Theory and Applications," in Wiley, 2022, pp.209-237, doi: 10.1002/9781119332237.ch8.
- [2] S. Gertler et al., "Narrowband microwave-photonic notch filters using Brillouin-based signal transduction in silicon," in *Nat Commun* 13, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-29590-0.
- [3] Md Minhajul Amin et al., "Design of Digital Filters for Noise Reduction in RF Communication Systems," in *International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering*, 2024, Vol. 12, Issue 1, pp. 14-21, doi: 10.5281/zenodo.14034150.
- [4] Jagraphon Obma, et al., "A Fully Balanced First Order High-Pass Filter." In *EUREKA: Physics and Engineering*, 2023, no. 14,OU Scientific Route, doi: 10.21303/2461-4262.2023.002833.
- [5] Q. H. Ramadhany, A. A. Pramudita and F. Y. Suratman, "Clutter Reduction in Detecting Trapped Human Respiration Under Rubble for FMCW Radar System," 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, 2023, pp. 716-721, doi: 10.1109/ISITIA59021.2023.10221122.
- [6] A. A. Pramudita et al., "Radar System for Detecting Respiration Vital Sign of Live Victim Behind the Wall," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 15, pp. 14670-14685, 1 Aug.1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3188165.
- [7] Q.H. Ramadhany et al., "DETEKSI PERNAPASAN MANUSIA MENGGUNAKAN RADAR FMCW 24 GHZ UNTUK MULTITARGET DALAM LINEAR DAN NON-LINEAR," in *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 2025, vol. 13, no. 3S1, pp. 416-422, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7633.
- [8] O. Nimych et al., "REVIEW OF MATHEMATICAL SUPPORT AND SOFTWARE FOR DESIGN OF SHF DEVICES," in *Science-Based Technologies*, 2022, vol. 55, issue 3, pp. 169, doi: 10.18372/2310-5461.55.16909.
- [9] R.Shubhashini et al., "ANALYSIS OF SIMULATION SOFTWARES FOR MICROWAVE," in *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 2014, vol. 2, issue 4, pp. 56-60.
- [10] M. W. M. Cunico, "ElectroCraft: A Comprehensive Guide to Electronics, Control Engineering, Instrumentation, PCB Design and the DIY Maker Culture," in *Concep3d.*, 2026.
- [11] David M. Pozar, "Microwave Engineering 4th edition," in Wiley, 2011.
- [12] M. Rishabhkumar and P. Parashar, "Design and Implementation of Butterworth, Chebyshev-I and Elliptic Filter for Digital Signal Analysis," in *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2018, vol. 5, issue 3, doi: 10.5120/17195-7390.
- [13] C. Tong," Materials for High Frequency Filters. In: *Advanced Materials and Components for 5G and Beyond*," in *Springer Series in Materials Science*, 2022, vol 327, doi: 10.1007/978-3-031-17207-6\_5.
- [14] S.S. Hamid et al., "A State-of-the-Art Review on CMOS Radio Frequency Power Amplifiers for Wireless Communication Systems," in *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 8, doi: 10.3390/mi14081551.
- [15] B. Wang, "Signal Processing Based on Butterworth Filter: Properties, Design, and Applications," in *MCEE*, 2024, vol. 97, doi: 10.54097/3cq7qb95.