

**RANCANG BANGUN ANALOG LOW PASS FILTER AKTIF PENDEKATAN
BUTTERWORTH TOPOLOGI SALLLEN-KEY ORDE 3**

**DESIGN OF ANALOG LOW PASS FILTER ACTIVE BUTTERWORTH
APPROACH SALLLEN-KEY TOPOLOGY THIRD-ORDER**

Gunawan Wicaksono*, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Sumarna, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Risa Nurullailiyah Sujono, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

*e-mail: gunawanwicaksono.2018@student.uny.ac.id (*corresponding author*)

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis filter low-pass analog aktif orde tiga dengan pendekatan Butterworth dan topologi Sallen-Key. Filter ini berfungsi menyaring sinyal frekuensi tinggi yang tidak diinginkan, dengan karakteristik respon frekuensi yang datar di passband dan penurunan tajam setelah frekuensi cutoff. Rangkaian dirancang melalui simulasi di Proteus dan dianalisis lebih lanjut menggunakan MATLAB, lalu direalisasikan secara fisik di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi FMIPA UNY. Proses pengujian mencakup analisis amplitudo keluaran, perbedaan fasa antara sinyal masukan dan keluaran, serta respons terhadap sinyal kotak. Hasil menunjukkan bahwa filter berhasil menurunkan amplitudo sinyal pada frekuensi tinggi dan menghasilkan respon fasa yang sesuai teori. Selain itu, ketika diberi sinyal kotak, rangkaian menunjukkan karakteristik low-pass yang stabil. Penelitian ini mendemonstrasikan bahwa rancangan Butterworth orde tiga dengan topologi Sallen-Key dapat diimplementasikan secara efektif sebagai sistem penyaringan sinyal analog frekuensi rendah.

Kata Kunci: *Butterworth, Filter Aktif, Filter Low Pass, Orde 3, Sallen-Key.*

Abstract. This study aims to design and analyze a third-order active analog low-pass filter using the Butterworth approach and the Sallen-Key topology. This filter functions to filter unwanted high-frequency signals, with a flat frequency response characteristic in the passband and a sharp drop after the cutoff frequency. The circuit was designed through simulations in Proteus and further analyzed using MATLAB, then physically realized in the Electronics and Instrumentation Laboratory of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences, UNY. The testing process includes analysis of the output amplitude, the phase difference between the input and output signals, and the response to a square signal. The results show that the filter successfully reduces the signal amplitude at high frequencies and produces a phase response that matches the theory. In addition, when given a square signal, the circuit shows stable low-pass characteristics. This study demonstrates that the third-order Butterworth design with the Sallen-Key topology can be effectively implemented as a low-frequency analog signal filtering system.

Kata Kunci: *Butterworth, Active Filter, Low Pass Filter, Third Order, Sallen-Key.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada era Revolusi Industri 4.0 telah mendorong integrasi sistem elektronik dalam berbagai aspek kehidupan, mulai dari komunikasi digital, pengolahan sinyal, sistem kendali, hingga perangkat medis dan industri (Feng & Sun, 2024; Khan et al., 2016). Dalam sistem-sistem tersebut, sinyal elektronik harus diproses secara akurat dan efisien agar informasi yang dibawa tetap utuh dan bebas dari gangguan. Salah satu komponen krusial dalam menjaga kualitas sinyal adalah filter, yang berfungsi untuk menyaring sinyal tidak diinginkan berdasarkan karakteristik frekuensinya (Basuki et al., 2021).

Filter merupakan rangkaian yang dirancang untuk melewatkan atau menolak sinyal berdasarkan frekuensi tertentu (Fu et al., 2023). Secara umum, filter dibedakan menjadi dua jenis, yaitu filter analog dan filter digital. Filter analog bekerja secara langsung terhadap sinyal kontinu dengan menggunakan kombinasi komponen pasif seperti resistor dan kapasitor, serta komponen aktif seperti op-amp (Pactitis, 2007). Di sisi lain, filter digital bekerja pada sinyal diskret melalui pemrosesan sinyal digital (Murphy & Robertson, 1994). Berdasarkan jenis frekuensi yang dilewatkan atau ditolak, filter diklasifikasikan menjadi Low-Pass Filter (LPF), High-Pass Filter (HPF), Band-Pass Filter (BPF), dan Band-Stop Filter (BSF) (Dahl et al., 2023). Di antara jenis-jenis tersebut, Low-Pass Filter (LPF) banyak digunakan dalam sistem audio, komunikasi radio frekuensi, dan sensor karena kemampuannya dalam mereduksi noise atau interferensi frekuensi tinggi (Dujpen et al., 2025).

Namun, dalam penerapannya, berbagai hambatan teknis dapat muncul. Salah satu tantangan utama adalah memilih dan merancang filter yang mampu menyaring sinyal dengan efisiensi dan presisi tinggi, terutama dalam domain frekuensi rendah. LPF yang tidak dirancang dengan optimal dapat menyebabkan distorsi sinyal, penurunan keakuratan transmisi data, hingga kegagalan fungsi pada sistem kontrol kritis (Dobrev et al., 2025).

Salah satu parameter penting dalam perancangan filter adalah orde filter, yang menunjukkan tingkat ketajaman pemisahan sinyal pada frekuensi cutoff (Kumari & Nand, 2024). Semakin tinggi orde filter, semakin tajam transisi dari passband ke stopband, sehingga menghasilkan penyaringan yang lebih selektif. Filter orde tiga, misalnya, memiliki slope penurunan sebesar -60 dB/decade, yang secara signifikan lebih efektif dibandingkan filter orde satu (Khan et al., 2016).

Untuk mendapatkan karakteristik penyaringan yang optimal, perancangan filter memerlukan pendekatan matematis yang tepat. Salah satu pendekatan paling umum dan stabil adalah pendekatan Butterworth (Hussin et al., 2016), yang dikenal memiliki respon amplitudo paling datar (maximally flat) di daerah passband (Olivier, 2021; Podder et al., 2014). Pendekatan ini menghasilkan filter dengan respon frekuensi yang halus dan tanpa ripple, sehingga ideal untuk berbagai aplikasi pengolahan sinyal, termasuk sistem komunikasi dan sensorik (Robertson & Dowling, 2003).

Di sisi lain, pemilihan topologi rangkaian juga menjadi aspek fundamental yang memengaruhi keberhasilan desain. Topologi Sallen-Key merupakan salah satu yang paling banyak digunakan dalam perancangan filter analog aktif karena menawarkan kemudahan dalam pengaturan frekuensi cutoff dan kualitas (Q-factor) (Yilmaz & Ucuncu, 2023). Kombinasi antara pendekatan Butterworth dan topologi Sallen-Key memberikan keseimbangan antara performa, stabilitas, dan kemudahan implementasi dalam sistem praktis (Mahata et al., 2021).

Permasalahan lainnya yang sering dihadapi adalah perbedaan antara karakteristik ideal filter dengan karakteristik aktual setelah direalisasikan. Dalam banyak kasus, deviasi ini timbul akibat ketidaksempurnaan komponen, keterbatasan toleransi, atau ketidaktepatan dalam simulasi awal (Li, 2024; Rustamaji et al., 2013). Oleh karena itu, penting untuk

melakukan simulasi dan analisis mendalam menggunakan perangkat lunak yang dapat memodelkan perilaku filter secara mendekati kondisi riil.

Pada konteks pembelajaran dan eksperimen elektronika, simulasi rangkaian menjadi metode penting untuk menguji dan menganalisis desain sebelum direalisasikan secara fisik. Software seperti Proteus memungkinkan pembuatan skematik dan analisis respons frekuensi secara virtual (Shaikh et al., 2023), sedangkan MATLAB memberikan dukungan dalam analisis numerik dan visualisasi spektrum serta respon fasa (Si Nguyen, 2022; Wang, 2024).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa simulasi LPF berbasis Butterworth dengan software seperti MATLAB (Shaikh et al., 2023) dan Proteus mampu menghasilkan filter dengan karakteristik mendekati teori ideal, khususnya dalam domain frekuensi rendah (Mei, 2022; Santos, 2024). Namun, masih terdapat kebutuhan untuk mengembangkan desain filter aktif orde menengah seperti orde tiga yang stabil, mudah direalisasikan, dan efektif dalam mereduksi gangguan sinyal frekuensi tinggi (Huang, 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini membahas perancangan dan simulasi filter low-pass analog aktif orde tiga dengan menggunakan pendekatan Butterworth dan topologi Sallen-Key. Proses perancangan dilakukan secara sistematis melalui simulasi di Proteus dan analisis lanjutan di MATLAB. Kajian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi praktis dan teoretis terhadap pengembangan sistem penyaringan sinyal frekuensi rendah yang efisien dan presisi tinggi.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan April hingga Juli 2025 di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta. Penelitian ini mengkaji perancangan dan pengujian filter low-pass analog aktif orde tiga berbasis pendekatan Butterworth dan topologi Sallen-Key, dengan variabel bebas berupa frekuensi sinyal masukan, variabel kontrol berupa A-pass, A-stop, dan gain (K), serta variabel terikat berupa amplitudo sinyal keluaran.

1. Persiapan dan Perancangan Awal

Tahapan awal meliputi penentuan spesifikasi desain berupa frekuensi batas (cutoff), nilai gain, dan tingkat atenuasi yang diharapkan. Berdasarkan parameter tersebut, dilakukan perhitungan nilai-nilai resistor dan kapasitor yang sesuai dengan karakteristik filter Butterworth. Nilai-nilai ini menjadi dasar dalam perancangan simulasi dan realisasi filter analog. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain CRO (Cathode Ray Oscilloscope), AFG (Audio Frequency Generator), power supply, multimeter, laptop, solder, dan penghisap tenol. Sementara bahan-bahannya meliputi resistor, kapasitor, IC LM741, papan PCB, dan audio jack 3.5 mm mono.

2. Simulasi Rangkaian

Simulasi rangkaian dilakukan menggunakan perangkat lunak Proteus. Tahap pertama adalah membuat simulasi filter orde satu berdasarkan hasil perhitungan komponen. Setelah itu, dilanjutkan dengan simulasi filter orde dua menggunakan konfigurasi Sallen-Key. Setiap simulasi diuji dengan frekuensi input yang bervariasi untuk mengamati respons amplitudo dan fasa sinyal keluarannya. Simulasi ini penting sebagai tahap verifikasi awal sebelum realisasi fisik dilakukan.

3. Perakitan dan Pengujian Rangkaian Fisik

Komponen elektronik yang telah ditentukan dirakit di atas papan PCB bolong sesuai dengan rancangan yang disimulasikan sebelumnya. Setelah proses penyolderan selesai, dilakukan pengujian bertahap. Rangkaian orde satu dan orde dua diuji secara terpisah dengan memberikan sinyal sinusoida dari AFG dan diamati melalui CRO. Kanal 1 CRO

digunakan untuk mengamati sinyal masukan, sementara kanal 2 untuk sinyal keluaran. Pengujian ini mencakup pencatatan amplitudo keluaran dan perubahan respons terhadap variasi frekuensi. Setelah itu, kedua rangkaian digabung untuk membentuk rangkaian orde tiga dan diuji dengan prosedur yang sama.

4. Pengambilan dan Analisis Data

Pengambilan data mencakup pengukuran amplitudo sinyal keluaran dari filter orde satu, dua, dan tiga untuk setiap variasi frekuensi input. Khusus untuk filter orde tiga, dilakukan pengukuran perbedaan fasa antara sinyal masukan dan keluaran menggunakan CRO. Selain itu, dilakukan pengujian tambahan dengan memberikan masukan sinyal kotak pada filter orde tiga. Sinyal keluarannya direkam melalui sambungan audio jack 3.5 mm mono yang telah dilengkapi pembagi tegangan untuk melindungi perangkat perekam. Hasil rekaman kemudian dianalisis menggunakan MATLAB untuk mengamati respon waktu dan karakteristik frekuensi dari sinyal keluaran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

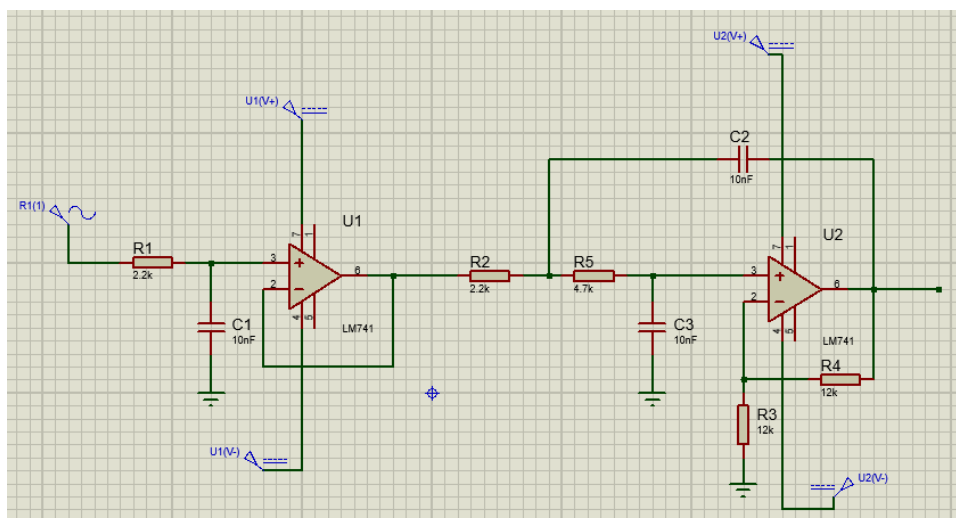
Hasil

Penelitian ini menghasilkan tiga jenis filter low-pass analog aktif dengan pendekatan Butterworth, masing-masing pada orde satu, dua, dan tiga. Setiap filter diuji melalui simulasi menggunakan Proteus dan kemudian direalisasikan secara fisik serta diuji menggunakan perangkat laboratorium seperti CRO dan AFG.

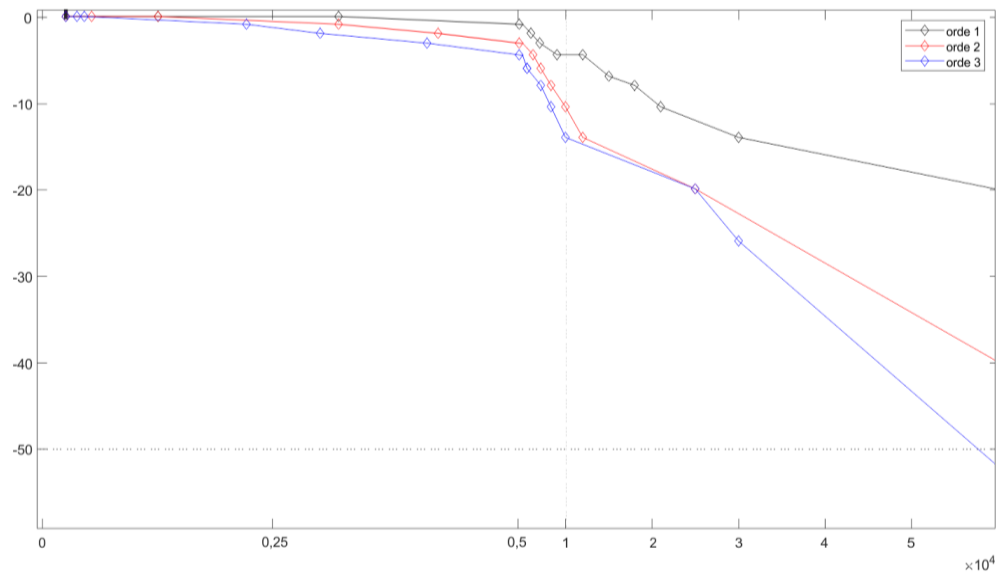
Pada pengujian frekuensi, diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Filter Orde 1 memiliki frekuensi cutoff pada sekitar 7 kHz, dengan attenuasi -3 dB pada titik tersebut, dan redaman maksimum -20 dB pada 50 kHz.
2. Filter Orde 2 memiliki frekuensi cutoff pada 5 kHz, dengan redaman maksimum -40 dB pada 50 kHz.
3. Filter Orde 3 menunjukkan frekuensi cutoff pada 4 kHz, dengan redaman maksimum mencapai -52 dB pada 50 kHz. Ketika dianalisis menggunakan metode logaritmik gain, nilai ini ekuivalen dengan orde 2,6, yang mendekati orde 3 secara teoritis.

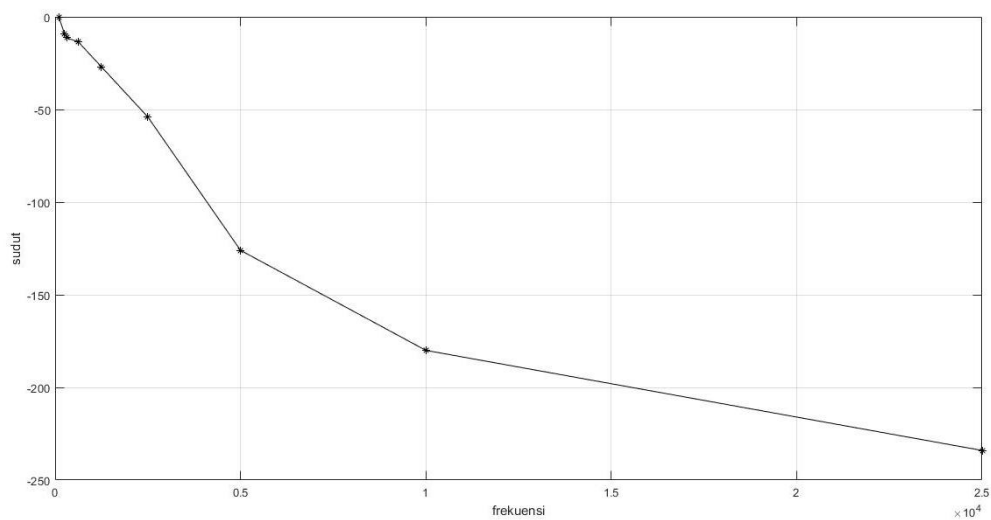
Dari hasil pengukuran fasa menggunakan CRO, diperoleh bahwa pada frekuensi 100 Hz, tidak terdapat pergeseran fasa yang signifikan. Pada 250 Hz, terjadi pergeseran fasa sebesar -9 derajat. Adapun filter orde 3 menunjukkan pergeseran -90° pada sekitar 4 kHz dan -180° pada 10 kHz. Ketiga filter diuji secara berurutan, dan hasilnya dikonfirmasi melalui tampilan sinyal pada CRO dan pengolahan data menggunakan MATLAB. Pengujian dilakukan secara menyeluruh, baik secara simulasi maupun perangkat keras.



Gambar 1. Rangkaian Filter Orde 3 Menggunakan Topologi Sallen-Key



Gambar 2. Grafik Respons Frekuensi Filter Orde 1, 2, dan 3



Gambar 3. Grafik Respons Fasa Filter Orde 3

Pembahasan

Perancangan filter low-pass analog aktif menggunakan pendekatan Butterworth memberikan performa penyaringan sinyal yang stabil dan dapat diandalkan. Filter Butterworth dikenal memiliki respons amplitudo datar di passband dan transisi halus ke stopband, menjadikannya cocok untuk berbagai aplikasi elektronika dan sinyal (Olivier, 2021; Wang, 2024).

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan orde filter terbukti memberikan peningkatan selektivitas. Filter orde 1 menunjukkan slope penurunan sebesar -20 dB/decade, sesuai teori. Filter orde 2 meningkat menjadi -40 dB/decade, dan filter orde 3 mencapai -60 dB/decade dengan attenuasi -52 dB pada 50 kHz, mengindikasikan bahwa filter telah bekerja sesuai karakteristik teoritis (Dujpen et al., 2025; Mahata et al., 2021).

Variasi frekuensi cutoff antara ketiga filter (7 kHz, 5 kHz, dan 4 kHz) bisa dijelaskan melalui toleransi komponen pasif dan pengaruh efek loading antar tahap, yang umum terjadi dalam perancangan fisik filter (Kumari & Nand, 2024; Pactitis, 2007). Topologi Sallen-Key juga

cukup sensitif terhadap variasi nilai gain dan toleransi komponen.

Dari grafik respons frekuensi, terlihat bahwa peningkatan orde menghasilkan transisi frekuensi yang semakin tajam dari passband ke stopband, tanpa adanya ripple seperti pada filter Chebyshev atau Elliptic (Li, 2024). Hal ini menunjukkan keunggulan Butterworth dalam aplikasi sinyal yang memerlukan kestabilan bentuk gelombang (Rustamaji et al., 2013).

Pergeseran fasa yang terukur juga mencerminkan karakteristik Butterworth. Filter orde 3 menunjukkan nilai -90° pada 4 kHz dan -180° pada 10 kHz, yang berarti terjadi penundaan signifikan pada sinyal keluaran terhadap sinyal input. Ini sangat relevan pada sistem kendali dan komunikasi yang membutuhkan fase yang sinkron (Dobrev et al., 2025; Murphy & Robertson, 1994).

Pengujian dilakukan tidak hanya melalui simulasi Proteus dan MATLAB, tetapi juga pada perangkat fisik. Perakitan rangkaian pada PCB, penggunaan CRO dan AFG, serta pengukuran langsung menunjukkan bahwa rancangan filter ini dapat diimplementasikan dalam praktik laboratorium nyata maupun aplikasi edukatif (Basuki et al., 2021; Yilmaz & Ucuncu, 2023).

Secara keseluruhan, desain ini membuktikan bahwa peningkatan orde dalam filter analog aktif Butterworth memberikan peningkatan signifikan terhadap redaman dan ketajaman pemisahan frekuensi, dengan tetap mempertahankan kestabilan dan kehalusan respon. Kombinasi pendekatan teoritis, simulasi, dan uji eksperimen membentuk model pembelajaran dan rekayasa filter yang komprehensif.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa filter low-pass analog aktif orde tiga dengan pendekatan Butterworth dan topologi Sallen-Key dapat dirancang dan diimplementasikan secara efektif untuk menyaring sinyal frekuensi tinggi. Simulasi rangkaian menggunakan perangkat lunak Proteus dan analisis numerik di MATLAB berhasil memvisualisasikan karakteristik frekuensi dan respon fasa yang sesuai dengan teori. Hasil realisasi fisik menunjukkan bahwa rangkaian mampu meredam amplitudo sinyal pada frekuensi di atas titik cutoff, serta menunjukkan perbedaan fasa yang meningkat seiring kenaikan frekuensi, sebagaimana karakteristik umum filter orde tinggi. Ketika diberi masukan sinyal kotak, filter menunjukkan fungsi penyaringan yang stabil dan tidak terjadi distorsi berlebihan pada sinyal keluaran. Dengan demikian, perancangan filter Butterworth orde tiga berbasis Sallen-Key dapat menjadi alternatif efisien dan presisi tinggi dalam sistem penyaringan sinyal analog berfrekuensi rendah di bidang elektronika dan instrumentasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Departemen Pendidikan Fisika FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta atas dukungannya dalam menyediakan fasilitas selama proses penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Sumarna, M.Si., M.Eng. selaku pembimbing skripsi atas bimbingan dan arahannya yang sangat berharga. Terima kasih pula kepada semua pihak yang turut membantu dalam penyusunan jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Basuki, A., Widyastuti, D. S., & Driyo, C. (2021). Implementasi Low Pass Filter pada Pembatas Bidang Komunikasi Suara untuk Meningkatkan Kapasitas Kanal Komunikasi. *Kurvatek*, 6(2), 237–246. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v6i2.2743>
- Dahl, N. J., Muntal, P. L., & Andersen, M. A. E. (2023). Time-Based High-Pass, Low-Pass, Shelf, and Notch Filters. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 29(6), 33–40. <https://doi.org/10.5755/j02.eie.35277>

- Dobrev, D., Neycheva, T., Krasteva, V., & Jekova, I. (2025). Design of High-Pass and Low-Pass Active Inverse Filters to Compensate for Distortions in RC-Filtered Electrocardiograms. *Technologies*, 13(159), 1–28. <https://doi.org/10.3390/technologies13040159>
- Duijpen, T., Khwunnak, C., Lertkonsarn, S., & Thitapars, S. (2025). The Development of A Fully Balanced Active-RC Low-Pass Filter. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2025(2), 113–120. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003728>
- Feng, H., & Sun, L. (2024). Academic Journal of Science and Technology Design and Simulation of Butterworth Low-pass Filter. *Academic Journal of Science and Technology*, 10(3), 106–110.
- Fu, H., Li, Y., & Zhuo, Q. (2023). Research on the Passive and Active Low Pass Filters. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 46, 260–265. <https://doi.org/10.54097/hset.v46i.7712>
- Huang, C.-S. (2023). An Adaptive Cutoff Frequency Design for Butterworth Low-Pass Filter Pursuing Robust Parameter Identification for Battery Energy Storage Systems. *Batteries*, 9(198), 1–15. <https://doi.org/10.3390/batteries9040198>
- Hussin, S. F. B., Birasamy, G., & Hamid, Z. B. (2016). Design of Butterworth Band-Pass Filter. *Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Engineering and Technology*, 1, 33–46.
- Khan, N., Alam, M., Masud, A., & Amin, A. (2016). Importance of High Order High Pass and Low Pass Filters. *World Applied Sciences Journal*, 34(9), 1261–1268. [https://www.idosi.org/wasj/wasj34\(9\)16/20.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj34(9)16/20.pdf)
- Kumari, S., & Nand, D. (2024). Realization of n th Order Wave Active Low-Pass Filter Using Differential Difference Current Conveyor. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 33(10), 1–17. <https://doi.org/10.1142/S0218126624501809>
- Li, Z. (2024). Chebyshev filter and Butterworth filters: Comparison and applications in different cases. *Applied and Computational Engineering*, 38(1), 102–111. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/38/20230538>
- Mahata, S., Herencsar, N., Kubanek, D., Kar, R., Mandal, D., & Goknar, I. C. (2021). A Fractional-Order Transitional Butterworth-Butterworth Filter and Its Experimental Validation. *IEEE Access*, 9, 129521–129527. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3114182>
- Mei, A. (2022). The Design and Simulation of a Fifth-order Chebyshev Low-Pass Filter. *Journal of Physics: Conference Series*, 2386(012066), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2386/1/012066>
- Murphy, S. D., & Robertson, D. G. E. (1994). Construction of a High-Pass Digital Filter from a Low-Pass Digital Filter. *Journal of Applied Biomechanics*, 10(4), 374–381. <https://doi.org/10.1123/jab.10.4.374>
- Olivier, P. (2021). Butterworth filters as tracking differentiators. *TechRxiv*, 1–3. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.13646678.v1>

- Pactitis, S. A. (2007). *Active Filters: Theory and Design*. New York: CRC Press.
- Podder, P., Mehedi Hasan, M., Rafiqul Islam, M., & Sayeed, M. (2014). Design and Implementation of Butterworth, Chebyshev-I and Elliptic Filter for Speech Signal Analysis. *International Journal of Computer Applications*, 98(7), 12–18. <https://doi.org/10.5120/17195-7390>
- Robertson, D. G. E., & Dowling, J. J. (2003). Design and responses of Butterworth and critically damped digital filters. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(6), 569–573. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(03\)00080-4](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(03)00080-4)
- Rustamaji, R., Darlis, A. R., & Suparman, S. (2013). Simulasi Perancangan Filter Analog dengan Respon Chebyshev. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 1(2), 269–280. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v1i2.106>
- Santos, D. (2024). Filtering and Noise Extraction from ECG Signals Using Butterworth Filter. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.0136.v1>
- Shaikh, M. Z., Mal, K., Kumar, D., Ali, E., Chowdhry, B. S., & Baro, E. N. (2023). Simulation and analysis of ideal low pass filter response using MATLAB. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 42(3), 110. <https://doi.org/10.22581/muet1982.2303.12>
- Si Nguyen, P. (2022). *The Transfer Function of the nth-Order Digital Butterworth Low Pass Filter*. 1–5. <https://www.researchgate.net/publication/358716710>
- Wang, B. (2024). Signal Processing Based on Butterworth Filter: Properties, Design, and Applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 97, 72–77. <https://doi.org/10.54097/3cq7qb95>
- Yilmaz, E., & Ucuncu, M. (2023). Coaxial Low-Pass Filter Design and Manufacture. *IEEE Access*, 11, 15845–15854. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3244987>