PERANCANGAN *FILTER CROSSOVER SUBWOOFER* ANALOG AKTIF *LINKWITZ RILEY* 24 PADA SISTEM *AUDIO*

SKRIPSI

Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Jurusan Teknik Elektro

Oleh:
DAVE ADONIA HIZKIA
NIM D1021211024



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
PONTIANAK
2025

PERANCANGAN *FILTER CROSSOVER SUBWOOFER* ANALOG AKTIF *LINKWITZ RILEY* 24 PADA SISTEM *AUDIO*

SKRIPSI

Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Jurusan Teknik Elektro

Skripsi Diajukan Sebagai Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Dalam Bidang Teknik Elektro

Oleh:
DAVE ADONIA HIZKIA
NIM D1021211024

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
PONTIANAK
2025

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email : ft@untan.ac.id Website : http://teknik.untan.ac.id

SURAT KETERANGAN SELESAI PENULISAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Kedua pada penulisan skripsi yang berjudul "**Perancangan *Filter Crossover Subwoofer* Analog Aktif *Linkwitz Riley* 24 Pada Sistem *Audio***" yang ditulis olch mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.

Nama : Dave Adonia Hizkia
NIM : D1021211024
Jurusan : Teknik Elektro
Prodi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Elektronika Dasar

Dengan ini menerangkan bahwa mahasiswa tersebut telah menyelesaikan penulisan skripsinya.

Pontianak, 28 Juli 2025

Pembimbing Utama,	Pembimbing Kedua,
Dr Dedy Suryadi, S.T., M.T.	Elang Derdian Marindani, S.T., M.T.
NIP. 196812031995121001	NIP. 197203011998021001

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dave Adonia Hizkia

NIM : DI021211024

menyatakan bahwa dalam SKRIPSI yang beijudul "PERANCANGAN *FILTER CROSSOVER SUBWOOFER* ANALOG AKTIF *LINKWITZ RILEY* 24 PADA SISTEM *AUDIO"* tidak terdapat karya yang pemah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu perguruan tinggi manapun. Sepanjang pengetahuan Saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pemah ditulis atas diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Rujukan.

Demikian pemyataan ini dibuat dengan sebenar-benamya. Saya sanggup menerima konsekuensi akademis dan hukum di kemudian hari apabila pemyataan yang dibuat ini tidak benar.

Pontianak, 28 Juli 2025



Dave Adonia Hizkia
NIM D1021211024

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email : ft@untan.ac.id Website : http://teknik.untan.ac.id

HALAMAN PENGESAHAN

PERANCANGAN FILTER *CROSSOVER SUBWOOFER* ANALOG AKTIF *LINKWITZ RILEY* 24 PADA SISTEM *AUDIO*

Jurusan Teknik Elektro
Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Oleh:

Dave Adonia Hizkia
NIM D1021211024

Telah dipertahankan di depan Penguji Skripsi pada tanggal 28 Juli 2025
dan diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana

Susunan Penguji Skripsi

Pembimbing Utama

Dr.Dedy Suryadi, S.T., M.T.
NIP. 196812031995121001

Penguji Utama

Ir. Syaifurrahman, S.T., M.T., IPM.
NIP. 197009211995121001

Pembimbing Kedua

Elang Derdian Marindani, S.T., M.T.
NIP. 197203011998021001

Penguji Kedua

Ir. Muhammad Saleh, S.T., M.T., IPM.
NIP. 196706161994121001

Pontianak, 28 Juli 2025
Dekan,

Dr.-Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM
NIP.196712231992031002

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat-Nya maka penelitian dan penulisan skripsi dengan judul "PERANCANGAN *FILTER CROSSOVER SUBWOOFER* ANALOG AKTIF *LINKWITZ RILEY* 24 PADA SISTEM *AUDIO*" ini dapat diselesaikan dengan baik.

Skripsi ini disusun untuk tujuan memperoleh gelar Strata 1 (S1) pada program studi Teknik Elektro, jurusan Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura Pontianak. Dalam prosesnya, penulis ingin menyampaikan penghargaan dan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung, mendampingi, serta membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, khususnya kepada:

1. Ibu dan Bapak selaku orang tua penulis yang selalu mendoakan dan mendukung penulis.
2. Bapak Prof. Dr.-Ing. Seno D. Panjaitan, S.T., M.T., IPM. Selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
3. Bapak Elang Derdian Marindani, S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing pendamping sekaligus ketua Progam Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
4. Bapak Ir. Muhammad Saleh, S.T., M.T., IPM. Selaku pembimbing akademik penulis sekaligus penguji pendamping.
5. Bapak Dr. Dedy Suryadi, S.T., M.T. Selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bantuan, masukan, kritik, serta saran dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak Ir. Syaifurrahman, S.T., M.T., IPM. Selaku dosen penguji utama
7. Bapak dan Ibu dosen pengajar di Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura khususnya bidang studi teknik elektro atas pengajaran, bimbingan serta perhatian yang diberikan selama ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa dan semua pihak yang telah banyak membantu baik moral dan materi dalam menyelesaikan skripsi.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan akibat keterbatasan pengetahuan yang dimiliki. Untuk

itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangatlah dibutuhkan penulis dalam memperbaiki kekurangan pada skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat sebagai bahan literatur untuk menambah ilmu pengetahuan dan masukan bagi semua pihak khususnya pada konsentrasi Elektronika Dasar Program Studi Teknik Elektro, semoga dapat dipergunakan dengan semestinya.

Pontianak, 28 Juli 2025

Penulis,



Dave Adonia Hizkia

NIM D1021211024

ABSTRAK

Sistem *audio* yang berkualitas sangat bergantung pada kejelasan distribusi frekuensi, khususnya pada rentang frekuensi rendah yang ditangani oleh *subwoofer*. *Filter crossover* berperan penting dalam memisahkan sinyal frekuensi agar setiap komponen speaker bekerja secara optimal sesuai rentangnya. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi *filter crossover* analog aktif berbasis *Linkwitz-Riley* orde ke-4 (LR24) untuk aplikasi *subwoofer* dalam sistem *audio*. *Filter* LR24 dipilih karena mampu memberikan transisi frekuensi yang halus dan simetris dengan *slope* 24 dB/oktaf. Metode penelitian meliputi perancangan *filter* dan *preamplifier*, pemilihan komponen, serta pengujian performa menggunakan sinyal uji berupa *pink noise*. Evaluasi dilakukan melalui analisis spektrogram, spektrum frekuensi, dan pengamatan bentuk gelombang menggunakan osiloskop. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *filter* analog *Linkwitz-Riley* orde empat mampu mencapai frekuensi potong sebesar 126,8 Hz, dengan kemiringan redaman sebesar 24 dB/oktaf pada 249,4 Hz. Spektrogram dan spektrum menunjukkan bahwa *filter* mampu meredam frekuensi tinggi secara efektif, dengan performa mendekati *filter* digital *Butterworth* dan *Bessel* orde empat pada unit DBx 260. *Preamplifier* yang dirancang menunjukkan penguatan sinyal yang stabil dan merata pada seluruh rentang frekuensi *audio* tanpa distorsi bentuk gelombang yang signifikan. Nilai penguatan aktual mendekati nilai teoritis meskipun pembacaan dibatasi oleh spesifikasi *sound card*. Pengambilan data dilakukan sebanyak 10 kali pengujian untuk memastikan akurasi dan konsistensi data, dan hasilnya menunjukkan performa yang andal dan presisi. Penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun menggunakan komponen analog sederhana dan *op-amp general-purpose*, sistem yang dirancang mampu memberikan performa yang kompetitif serta dapat menjadi alternatif efisien dalam pengolahan frekuensi rendah untuk aplikasi *audio* profesional maupun hiburan.

Kata kunci: *Filter Crossover, Linkwitz-Riley 24, Subwoofer,* Sistem *Audio,* Attenuasi*,* Frekuensi

ABSTRACT

A high-quality audio system strongly depends on the clarity of frequency distribution, particularly in the low-frequency range handled by the subwoofer. The crossover filter plays a crucial role in separating frequency signals so that each speaker component operates optimally within its designated range. This study focuses on the design and implementation of a 4th-order active analog Linkwitz-Riley crossover filter (LR24) for subwoofer applications in audio systems. The LR24 filter was chosen for its ability to provide smooth and symmetrical frequency transitions with a slope of 24 dB/octave. The research method includes the design of the filter and preamplifier, component selection, and performance testing using pink noise as the test signal. Evaluation was conducted through spectrogram analysis, frequency spectrum measurements, and waveform observation using an oscilloscope. Test results show that the 4th-order analog Linkwitz-Riley filter achieves a cutoff frequency of 126.8 Hz, with an attenuation slope of 24 dB/octave at 249.4 Hz. Both spectrogram and spectrum analysis indicate that the filter effectively attenuates high frequencies, with performance approaching that of 4th-order digital Butterworth and Bessel filters implemented on a DBx 260 unit. The designed preamplifier demonstrated stable and consistent signal amplification across the entire audio frequency range without significant waveform distortion. The actual gain values closely match theoretical expectations, although full-scale readings were limited by the sound card's specifications. Data collection was conducted through 10 repeated measurements to ensure accuracy and consistency, with results indicating reliable and precise performance. This study concludes that, despite using basic analog components and general-purpose op-amps, the designed system is capable of delivering competitive performance and can serve as a cost-effective alternative for low-frequency processing in both professional and entertainment audio applications.

Keyword: Crossover Filter, Linkwitz-Riley 24, Subwoofer, Audio System, Attenuation, Frequency

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **viii**
DAFTAR TABEL ..... **x**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xi**
DAFTAR ISTILAH ..... **xii**
DAFTAR SINGKATAN ..... **xx**
BAB I PENDAHULUAN **I-1**
1.1 Latar belakang I-1
1.2 Perumusan masalah I-3
1.3 Tujuan dan sasaran penelitian I-4
1.4 Pembatasan masalah I-4
1.5 Sistematika penulisan I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **II-1**
2.1 Penelitian terkait II-1
2.2 Sistem *audio* II-3
2.3 Konsep *filter crossover* II-4
2.3.1 Jenis *crossover* berdasarkan rangkaian II-4
2.3.2 Jenis *crossover* berdasarkan jumlah jalur atau *way* II-5
2.4 *Subwoofer* II-8
2.5 Teori *filter crossover linkwitz-riley* II-8
2.6 Teori *decibel* II-11
2.7 *Preamplifier* II-12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN **III-1**
3.1 Metode perancangan sistem III-1
3.2 Perhitungan *filter* yang dirancang III-3
3.2.1 Perhitungan nilai kualitas *filter* III-3

3.2.2 Perhitungan perbandingan nilai C III-4
3.2.3 Perhitungan dan penyesuaian nilai R dan C pada *filter* s*ubwoofer* yang dirancang III-4
3.2.4 Perhitungan penguatan pada *filter* yang dirancang III-7
3.3 Perhitungan *preamplifier* yang dirancang III-7
3.4 Alat dan bahan III-10
3.4.1 Alat III-10
3.4.2 Bahan III-12
3.5 Lokasi penelitian III-14
3.6 Langkah-langkah penelitian III-14
3.6.1 Studi literatur III-14
3.6.2 Studi pustaka III-14
3.6.3 Skema perancangan sistem III-14
3.6.4 Skema aplikasi *preamp* dan *crossover* pada sistem suara III-16
3.7 Variabel dan data III-16
3.7.1 Variabel penelitian III-17
3.7.2 Data peneltian III-17
3.8 Analisis hasil III-19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN IV-1
4.1 Pengujian *filter* yang dirancang terhadap *filter* lainnya IV-1
4.1.1 Hasil pengujian spektograf IV-2
4.1.2 Analisis spektogram IV-4
4.1.3 Hasil pengujian spektrum IV-5
4.1.4 Analisis spektrum IV-6
4.1.5 Hasil pengujian osiloskop IV-14
4.1.6 Analisis bentuk gelombang IV-15
4.2 Pengujian *preamplifier* yang dirancang IV-19
4.2.1 Hasil pengujian spektograf IV-21
4.2.2 Analisis spektogram IV-22
4.2.3 Hasil pengujian spektrum IV-22
4.2.4 Analisis spektrum IV-24
4.2.5 Hasil pengujian osiloskop IV-25

4.2.6 Analisis bentuk gelombang IV-26
BAB V PENUTUP V-1
5.1 Kesimpulan V-1
5.2 Saran V-2
DAFTAR RUJUKAN xxii

DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1 Kurva *fletcher-munson* [10] I-3
Gambar II.1 Rangkaian *filter* pasif [3] II-5
Gambar II.2 Rangkaian *filter* aktif [4] II-5
Gambar II.3 Grafik respons frekuensi dari *filter crossover* 3 jalur [15] II-7
Gambar II.4 Respons frekuensi yang diukur dari sistem utama (*L-Acoustics K2*), sistem *sub* (*L-Acoustics KS28*), dan hasil penjumlahan keduanya[5]. II-8
Gambar II.5 Rangkaian *filter crossover* dan rumus frekuensi potong lr 12 [15] II-9
Gambar II.6 Konfigurasi rangkaian *filter low-pass* orde dua atau 1 tahap II-10
Gambar II.7 Rangkaian penguat *noninverting* II-13
Gambar III.1 Diagram alir penelitian III-2
Gambar III.2 Diagram alir perancangan *crossover* III-3
Gambar III.3 Rangkaian *filter* yang akan di rakit di PCB III-6
Gambar III.4 Rangkaian *preamp* yang akan di rakit di PCB III-10
Gambar III.5 DLMS DBx *Driverrack* 260 [20] III-11
Gambar III.6 Konfigurasi pin IC dual *Op-Amp* JRC4558 [22] III-12
Gambar III.7 12-*pin sealed potentiometer array* III-13
Gambar III.8 Diagram kerja *crossover* III-15
Gambar III.9 Skema aplikasi *preamp* dan *crossover* pada sistem suara III-16
Gambar III.10 Rentang warna yang divisualisasikan di *spectrogram*[21] III-18
Gambar III.11 Spektrum *pink noise*[21][19]. III-19
Gambar IV.1 Skenario pengujian spektrum dari *crossover* IV-1
Gambar IV.2 Skenario pengujian gelombang dari *crossover* IV-2
Gambar IV.3 Spektogram sinyal asli (*pink noise*) IV-3
Gambar IV.4 Spektogram *linkwitz-riley* orde empat (LR24) IV-3
Gambar IV.5 Spektogram *butterworth* orde empat (BW24) IV-4
Gambar IV.6 Spektogram *bessel* orde empat (BS24) IV-4
Gambar IV.7 Perbandingan *filter* yang dirancang terhadap *filter* lainnya IV-6
Gambar IV.8 Spektrum filter dengan penanda132.4 Hz IV-8
Gambar IV.9 Spektrum filter dengan penanda 126.8 Hz IV-9
Gambar IV.10 Spektrum filter dengan penanda 264.2 Hz IV-10
Gambar IV.11 Spektrum filter dengan penanda 249.4 Hz IV-11
Gambar IV.12 Grafik perbandingan tegangan asli dan setelah di *filter* IV-14
Gambar IV.13 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 31 Hz. IV-16
Gambar IV.14 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 62 Hz. IV-16
Gambar IV.15 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 125 Hz. IV-17
Gambar IV.16 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 250 Hz. IV-17
Gambar IV.17 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 500 Hz. IV-17
Gambar IV.18 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 1000 Hz. IV-18

Gambar IV.19 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 4000 Hz. IV-18
Gambar IV.20 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 2000 Hz. IV-18
Gambar IV.21 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 8000 Hz. IV-18
Gambar IV.22 Pengujian osiloskop pada *filter* untuk frekuensi 16000 Hz. IV-19
Gambar IV.23 Skenario pengujian spektrum dari *preamp* IV-20
Gambar IV.24 Skenario pengujian gelombang dari *preamp* IV-20
Gambar IV.25 Sinyal *preamp* terhadap *pink noise* IV-21
Gambar IV.26 Perbandingan *pink noise* terhadap sinyal *preamp* IV-23
Gambar IV.27 Grafik perbandingan tegangan asli dan setelah dikuatkan IV-25
Gambar IV.28 Pengujian osiloskop pada *preamp* untuk frekuensi 1000 Hz. . IV-27

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Rangkuman penelitian II-3
Tabel III.1 Tabel komponen yang digunakan untuk merancang *filter* III-6
Tabel III.2 Tabel komponen yang digunakan untuk merancang *preamp* III-9
Tabel III.3 Variabel penelitian *filter* yang dirancang..... III-17
Tabel III.4 *Level* penguatan masing-masing *band* frekuensi III-17
Tabel IV.1 Penguatan pada berbagai titik frekuensi pada *filter* yang dirancang menggunakan osiloskop IV-14
Tabel IV.2 Penguatan pada berbagai titik frekuensi pada *preamp* yang dirancang menggunakan osiloskop IV-26

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A DOKUMENTASI FISIK *FILTER* YANG DIRANCANG A-1

LAMPIRAN B TABEL *LEVEL* RATA-RATA DARI MASING-MASING *BAND* FREKUENSI *FILTER* B-1

LAMPIRAN C GAMBAR PENGUJIAN SPEKTRUM UNTUK 10 PENGUJIAN PADA *FILTER* YANG DIRANCANG C-1

LAMPIRAN D DOKUMENTASI FISIK *PREAMP* YANG DIRANCANG .. D-1

LAMPIRAN E TABEL *LEVEL* RATA-RATA DARI MASING-MASING *BAND* FREKUENSI *PREAMP* E-1

LAMPIRAN F GAMBAR PENGUJIAN SPEKTRUM UNTUK 10 PENGUJIAN PADA *PREAMP* YANG DIRANCANG F-1

LAMPIRAN G GAMBAR PENGUJIAN OSILOSKOP 10 *BAND* FREKUENSI UNTUK *PREAMP* YANG DIRANCANG G-1

DAFTAR ISTILAH

Akurat	Tepat (tt informasi, data, hasil, dsb), terbebas dari kemelesetan, kekeliruan, dsb; kena benar.
Akustik	Berkaitan dengan organ pendengar, suara, atau ilmu bunyi.
Amplifier	perangkat elektronik yang berfungsi untuk memperkuat sinyal *audio* atau suara. Tujuannya adalah agar suara yang dihasilkan oleh sumber *audio* (seperti mikrofon, alat musik, atau pemutar musik) bisa terdengar lebih jelas, keras, dan optimal melalui *loudspeaker*.
Amplitudo	Simpangan yang paling jauh dari titik keseimbangan pada getaran.
Analog	Bersangkut paut atau berhubungan dengan sistem atau peranti komputer yang menyajikan data yang bermacam-macam berdasarkan kualitas fisik yang terukur.
Anechoic	Istilah yang berarti "tanpa gema" atau "tidak memantulkan".
Array	Kumpulan elemen atau item yang sejenis dan tersusun dalam urutan tertentu.
Attenuation	attenuasi adalah ukuran pelemahan suatu sinyal saat melewati suatu sistem atau medium, biasanya dinyatakan sebagai rasio antara *input* terhadap *output* dalam hal daya, tegangan, atau arus. *Attenuation* menunjukkan seberapa besar amplitudo sinyal berkurang.
Audible	Dapat didengar atau kedengaran.
Audio	Suara yang dapat didengar, baik itu musik, ucapan, efek suara, atau kebisingan lingkungan. Secara umum, *audio* adalah representasi dari semua jenis suara. Dalam konteks teknologi, *audio* juga bisa merujuk pada sinyal listrik yang merepresentasikan suara.
Averaging	Rata-rata (angka, jumlah, dan seba*gain*ya) diperoleh dari jumlah keseluruhan unsur dibagi banyaknya unsur.
Band	Rentang frekuensi yang digunakan untuk mentransmisikan data.

Bandwidth	Rentang pada pita panjang gelombang, frekuensi, atau energy.
Bias	Belokan arah dari garis tempuhan karna menembus benda bening yang lain (seperti cahaya yang menembus kaca, bayangan yang berada dalam air).
Bookshelf	Berukuran kompak dan dirancang untuk ditempatkan di rak buku, meja, atau permukaan datar lainnya.
Buffer	Penyangga sinyal yang mencegah gangguan antar bagian rangkaian.
Bypass	Jalur melewati suatu komponen untuk mengalirkan sinyal.
Chamber	Dalam bahasa Indonesia bisa berarti ruang, kamar, bilik, atau dewan/majelis, tergantung konteksnya.
Clipping	Distorsi sinyal akibat amplifier yang bekerja melebihi batas kemampuannya, menghasilkan suara yang terpotong dan tidak enak didengar.
Control	Kontrol; Pengawasan; pemeriksaan; pengendalian.
Coupling	Kopling adalah transfer energi, baik yang disengaja maupun tidak disengaja, dari satu sirkuit atau bagian sirkuit ke sirkuit atau bagian lain.
Crossover	Rangkaian elektronik yang membagi sinyal *audio* menjadi beberapa rentang frekuensi, seperti frekuensi rendah, menengah, dan tinggi, yang kemudian dialirkan ke *Speaker* atau *Subwoofer* yang sesuai.
Cut-off	Titik tempat dua garis atau lebih mulai berpotongan.
Decibel	*Decibel (dB)* adalah satuan logaritmik yang digunakan untuk menyatakan perbandingan antara dua nilai, seperti daya, tegangan, arus, atau intensitas suara. Desibel Satuan yang digunakan untuk mengukur kekuatan atau tingkat suara. Dalam konteks *audio* dan akustik, dB menunjukkan tingkat tekanan suara (*Sound Pressure Level, SPL*) atau intensitas suara. *Decibel* bekerja dalam skala logaritmik, yang berarti bahwa peningkatan kecil dalam angka desibel menunjukkan peningkatan besar dalam intensitas suara.
Deformasi	Perubahan bentuk atau wujud dari yang baik menjadi kurang baik.

Degradasi	Penurunan kualitas, mutu, atau kondisi sesuatu.
Dinamis	Penuh semangat dan tenaga sehingga cepat bergerak dan mudah menyesuaikan diri dengan keadaan dan seba*gain*ya; mengandung dinamika; dinamik.
Distribusi	Penyaluran (pembagian, pengiriman) kepada beberapa orang atau ke beberapa tempat.
Distorsi	Perubahan bentuk yang tidak diinginkan; erotan.
Driver	Penggerak (umumnya untuk perangkat keras *audio*).
Earthing	Pembuatan jalur ke tanah (pentanahan).
Efisiensi	Kemampuan menjalankan tugas dengan baik dan tepat (dengan tidak membuang waktu, tenaga, biaya).
Eksponensial	Bersifat atau berkenaan dengan eksponen.
Energy	Fis kemampuan untuk melakukan kerja (misalnya untuk energi listrik dan mekanika); daya (kekuatan) yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai proses kegiatan, misalnya dapat merupakan bagian suatu bahan atau tidak terikat pada bahan (seperti sinar matahari); tenaga.
Equalizer	Perangkat atau fitur dalam sistem *audio* yang memungkinkan penyesuaian respon frekuensi, atau dengan kata lain, mengatur tingkat tinggi, tengah, dan rendah pada suara.
Feedback	Bahan yang diperoleh kembali dari penerapan sesuatu untuk unsur perbaikan dalam tindak lanjut.
Fidelity	*Fidelity* mengacu pada tingkat detail, akurasi, dan realisme suatu prototipe atau model dibandingkan dengan produk akhir yang sebenarnya.
Filter	Rangkaian listrik yang dapat meloloskan listrik arus rangga (bolak-balik) dari frekuensi atau selang frekuensi tertentu.
Flat	Datar berarti tidak bergelombang atau tidak berbukit, rata. Selain itu, "datar" juga bisa berarti sederhana atau biasa saja.
Frequency	Frekuensi atau *Frequency* adalah jumlah getaran gelombang elektrik per detik pada gelombang elektromagnetik.

Gain	*Gain* adalah ukuran penguatan suatu sinyal oleh sebuah sistem, biasanya dinyatakan sebagai rasio *output* terhadap *input* dalam hal daya, tegangan, atau arus.
Gelombang	Aliran getaran suara yang bergerak dalam eter (radio).
Generator	Pembangkit sinyal.
Grounding	Titik referensi dalam rangkaian listrik yang digunakan untuk mengukur voltase, sebagai jalur balik arus listrik, atau terhubung secara fisik ke bumi (tanah).
Headroom	Ruang atau cadangan yang tersedia dalam suatu sistem.
High-Pass	Jenis *filter* yang melewatkan frekuensi tinggi dan memblokir atau melemahkan frekuensi rendah. Dalam konteks *audio*, *filter* ini sering digunakan untuk menghilangkan bass yang tidak diinginkan dari suatu sinyal, sehingga menghasilkan suara yang lebih jernih dan fokus pada frekuensi tinggi. *Filter* ini juga dikenal sebagai *filter low-cut* karena fungsinya memotong frekuensi rendah.
Imersif	Pengalaman yang membuat seseorang merasa seolah-olah benar-benar terlibat dan hadir dalam suatu lingkungan atau situasi tertentu, baik secara fisik, mental, maupun emosional.
Impedansi	Nisbah antara beda potensial elektrik pada ujung-ujung suatu komponen dan arus yang melalui komponen tersebut; impedans.
Intensitas	Keadaan tingkatan atau ukuran intensnya.
Intervensi	Campur tangan dalam perselisihan antara dua pihak (orang, golongan, negara, dan seba*gain*ya).
Inverting	Membalikan polaritas sinyal *input*
Jumper	Berfungsi sebagai konduktor yang menghubungkan sirkuit, memungkinkan aliran listrik untuk melewati atau melompati bagian tertentu dari rangkaian.
Karakteristik	Tanda, ciri, atau fitur yang dapat digunakan sebagai identifikasi; kekhasan atau kualitas yang membedakan.
Koinsiden	Dalam konteks fisika dan teknik berarti "berimpit" atau "berada pada posisi yang sama." Dalam konteks *Speaker* atau sistem suara, penggerak (*driver*) yang "koinsiden" berarti bahwa sumber suara dari penggerak tersebut berada

	dilokasi yang sama atau sangat dekat satu sama lain, sehingga suara yang dihasilkan muncul dari satu titik sumber yang sama.
Komperhensif	Luas dan menyeluruh, mencakup seluruh aspek atau bagian dari suatu hal.
Kompleks	Mengandung beberapa unsur yang pelik, rumit, sulit, dan saling berhubungan.
Level	Tingkat kekuatan atau intensitas dari suatu sinyal *audio* yang diukur dalam satuan tertentu, seperti desibel (dB).
Limiting	Proses membatasi *level audio* agar tidak melebihi ambang batas tertentu, biasanya dalam produksi musik atau *audio*.
Linearitas	Sifat yang menunjukkan hubungan proporsional antara dua variabel, di mana perubahan pada satu variabel akan menghasilkan perubahan yang sebanding pada variabel lainnya.
Line Array	Sistem pengeras suara yang terdiri dari beberapa elemen speaker yang disusun secara vertikal dalam satu garis dan diumpankan dalam fase yang sama untuk menciptakan sumber suara yang menyerupai garis.
Live	Secara umum, "*live*" bisa berarti langsung atau hidup. Dalam konteks acara atau pertunjukan, "*live*" berarti siaran langsung, sementara dalam konteks kata kerja, "*live*" bisa berarti tinggal atau hidup di suatu tempat.
Logaritma	Eksponen pangkat yang diperlukan untuk memangkatkan bilangan dasar supaya beroleh bilangan tertentu (jika bilangan dasarnya 10, maka log 100 = 2, artinya 10 pangkat 2 = 100); kebalikan dari hitungan pangkat.
Logaritmik	Berkaitan dengan logaritma.
Loudspeaker	Perangkat elektronik yang mengubah sinyal listrik menjadi energi suara yang dapat didengar.
Low-Pass	*Filter* yang memungkinkan sinyal dengan frekuensi rendah melewati (melewatkan) dan meredam atau menghilangkan sinyal dengan frekuensi tinggi. *Filter* ini juga dikenal sebagai *filter high-cut* atau *filter treble-cut* dalam aplikasi *audio*.
Micro	seperjuta unit.

Mute	Bisu, diam, atau menonaktifkan suara.
Noise	Suara bising atau gangguan yang tidak diinginkan, baik itu dalam bentuk suara, sinyal listrik, atau bahkan dalam konteks komunikasi.
Octave	Mus nada yang ke-8 dalam deretan tangga nada diatonik yang mempunyai getaran sebanyak dua kali lipat. Fis selang antara dua bunyi yang rasio frekuensi dasarnya sama dengan dua.
Offset	Adanya tegangan atau arus DC yang tidak diinginkan pada *output* suatu rangkaian, terutama pada penguat.
Order	Orde adalah susunan dan urutan unsur-unsur matematika
Peak	Titik puncak dari amplitudo maksimum sinyal *audio* dalam periode tertentu.
Phase	Fase adalah tingkatan masa (perubahan, perkembangan, dan seba*gain*ya); wilayah materi yang seragam secara kimia, berbeda secara fisik, dan (seringkali) dapat dipisahkan secara mekanis.
Polinominal	Suku banyak adalah ekspresi matematika yang terdiri dari satu atau lebih suku, di mana setiap suku adalah hasil perkalian konstanta dan variabel yang dipangkatkan dengan bilangan bulat non-negatif. Pangkat tertinggi dari variabel dalam polinomial disebut derajat polinomial.
Potentiometer	Potensiometer adalah resistor variabel dengan tiga terminal yang salah satu terminalnya, yang disebut *wiper*, dapat digeser untuk mengubah nilai resistansi dalam rangkaian.
Preferensi	Pilihan atau kesukaan seseorang terhadap sesuatu, yang bisa berupa produk, jasa, atau bahkan ide.
Presisi	Dalam konteks pengukuran atau pengujian, mengacu pada tingkat keterulangan atau konsistensi hasil pengukuran ketika dilakukan berulang kali dalam kondisi yang sama. Artinya, jika suatu pengukuran diulang beberapa kali, hasil yang diperoleh harus mendekati satu sama lain, menunjukkan tingkat presisi yang tinggi.
Referensi	Sumber acuan (rujukan, petunjuk).
Resonansi	Peristiwa turut bergetarnya suatu benda karena pengaruh getaran gelombang elektromagnetik luar.

Ripple	Secara harfiah berarti riak atau gelombang kecil. Dalam konteks yang lebih luas, "*ripple*" juga bisa merujuk pada efek berantai atau dampak yang menyebar dari suatu peristiwa atau tindakan.
Roll-off	Menggambarkan seberapa cepat *filter* mengurangi sinyal pada frekuensi di luar frekuensi *cut-off*.
Sealed	Berarti tertutup, tersegel, atau terikat sehingga tidak bisa dibuka atau diubah.
Sinusoidal	Bentuk gelombang atau fungsi matematika yang berulang secara halus dan periodik, menyerupai kurva sinus.
Sinyal	Besaran listrik, seperti tegangan atau arus, yang berubah-ubah seiring waktu dan membawa informasi.
Sistematis	Teratur menurut sistem; memakai sistem; dengan cara yang diatur baik-baik.
Sistem *Audio*	Kumpulan perangkat yang digunakan untuk menangani, memproses, dan mengeluarkan suara, seperti *amplifier*, *Speaker*, dan perangkat pemrosesan *audio* lainnya. Sistem *audio* bertujuan untuk mereproduksi atau memperkuat suara dalam bentuk yang berkualitas bagi pendengarnya.
Sistemik	Kata sifat yang berarti berhubungan dengan atau memengaruhi keseluruhan sistem, bukan hanya bagian-bagian tertentu.
Slope	Ukuran kemiringan atau kecuraman suatu garis atau kurva, yang menunjukkan perubahan variabel dependen (Y) terhadap perubahan variabel independen (X).
Sound	Dalam bahasa Indonesia berarti bunyi atau suara. Secara umum, *sound* adalah getaran yang merambat melalui medium seperti udara, air, atau benda padat, dan dapat didengar oleh telinga manusia. Dalam konteks yang lebih luas, "*sound*" juga bisa merujuk pada sistem atau peralatan yang digunakan untuk menghasilkan, merekam, atau memperkuat suara, seperti *sound system*.
Speaker	Perangkat elektronik yang mengubah sinyal listrik menjadi gelombang suara melalui getaran membran. Digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti *audio* rumah, sistem suara profesional, komputer, dan perangkat portabel.

Spectrogram	Representasi visual dari spektrum yang bervariasi sepanjang waktu. Spektograf menampilkan informasi frekuensi, amplitudo, dan waktu sekaligus, sehingga memungkinkan kita melihat bagaimana energi frekuensi berubah seiring waktu.
Spectrum	Representasi frekuensi dari suatu sinyal. Spektrum menunjukkan bagaimana energi atau amplitudo sinyal didistribusikan diberbagai frekuensi.
Stage	Tahap adalah bagian dari perkembangan (pertumbuhan); bagian dari sesuatu yang ada awal dan akhirnya; bagian dari urutan (menegak atau menyamping) tingkat; jenjang.
Stereo	Perekaman atau penyiaran dengan produksi suara yang lebih realistis dengan menggunakan dua saluran suara, menggunakan dua mikrofon beserta dua pengeras suara yang digunakan bersamaan.
Subwoofer	Jenis *Speaker* khusus yang dirancang untuk mereproduksi frekuensi suara rendah (bass), biasanya dalam rentang 20 Hz hingga 120 Hz.
Tonal	Berkaitan atau memiliki nada.
Trace	Jalur konduktif yang menghubungkan komponen elektronik pada papan sirkuit.
Validasi	Pengujian kebenaran atas sesuatu.
Voltase	Tegangan listrik diukur dalam volt.
Waveform	Bentuk gelombang adalah representasi visual dari sinyal yang berubah terhadap waktu. Secara sederhana, bentuk gelombang menunjukkan bagaimana suatu sinyal, seperti suara atau listrik, berubah dalam bentuk grafik.
Way	Arah; jurusan; tujuan; maksud.
Wiper	Memiliki arti sebagai sesuatu yang menyapu, menggeser, atau membersihkan suatu permukaan dan fungsinya biasanya bergerak bolak-balik atau memutar.

DAFTAR SINGKATAN

μ	*Micro*
ω	Omega (huruf kecil)
A	Penguatan (*gain*) jika A>1; Pelemahan (attenuasi) {*attenuation*} jika A<1
A_v	A dalam rasio
A_{dB}	A dalam *decibel*
AC	*Alternating Current*
C	*Capacitance*
dB	*Decibel*
DC	*Direct Current*
div	*Division*
BS	*Bessel*
BW	*Butterworth*
dB	*Decibel*
DLMS	*Digital Loudspeaker Mangemet System*
F	*Farad; Frequency*
F_c	*Frequency Cut-Off*
Hz	*Hertz*
IC	*Integrated Circuit*
k	Kilo
LR	*Linkwitz Riley*
m	Mili
n	Nano
Op-Amp	*Operational Amplifier*
PA	*Public Address*
PCB	*Printed Circuit Board*

R	*Resistance*
RC	Resistor Kapasitor
RL	Resistor Induktor
RLC	Resistor Induktor Kapasitor
SIM	*Source-Independent Measurement*
SPL	*Sound Pressure Level*
V	*Volt*
Vpp	*Voltage Peak to Peak*
W	*Watt*

BAB I
PENDAHULUAN

Kebutuhan sistem suara dengan *fidelity* tinggi sangatlah penting. Salah satu elemen penting dalam sistem *audio* adalah *Subwoofer*, yang berfungsi menangani frekuensi rendah untuk menghasilkan suara bass yang mendalam dan kaya. Untuk mencapai hasil suara yang optimal pada *Subwoofer*, dibutuhkan desain *filter crossover* yang mampu memisahkan sinyal frekuensi rendah dari sinyal lainnya secara akurat. Di sinilah peran penting *filter* analog aktif, khususnya tipe *Linkwitz-Riley* orde ke-4 (LR24), menjadi sorotan. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan evaluasi *filter crossover* analog aktif *Linkwitz-Riley* orde 4 untuk *Subwoofer*, sebagai upaya meningkatkan *fidelity* suara terutama pada rentang frekuensi rendah dalam sistem *audio*.

1.1 Latar belakang

Fidelity suara dalam sistem *audio* sangat dipengaruhi oleh kejelasan distribusi frekuensi pada tiap komponen *Speaker*[1]. *Subwoofer*, yang berfungsi untuk menangani frekuensi rendah, memerlukan *filter Crossover* yang dirancang dengan baik agar suara yang dihasilkan memiliki kualitas bass yang mendalam dan bebas dari distorsi. Salah satu tantangan utama dalam perancangan sistem *Crossover* adalah memisahkan sinyal frekuensi rendah dan tinggi dengan presisi, sehingga suara yang dihasilkan lebih jelas, detail, dan terfokus pada masing-masing jalur frekuensi [2].

Filter Crossover analog aktif telah menjadi pilihan yang populer karena kemampuannya dalam memisahkan sinyal secara efisien serta meminimalkan kehilangan sinyal, dibandingkan dengan *filter* pasif [3]. Dalam konteks ini, performa *filter Linkwitz-Riley* orde ke-4 atau yang dikenal sebagai LR 24 menjadi sangat penting. *Filter* LR 24 menawarkan keunggulan dalam hal transisi frekuensi yang halus dan tanpa distorsi fase pada titik *Crossover* [4]. Hal ini memungkinkan setiap komponen *Speaker* untuk bekerja sesuai dengan frekuensi yang ditugaskan, meningkatkan pengalaman mendengarkan dan menghasilkan suara yang optimal pada frekuensi rendah, khususnya pada *Subwoofer* [1].

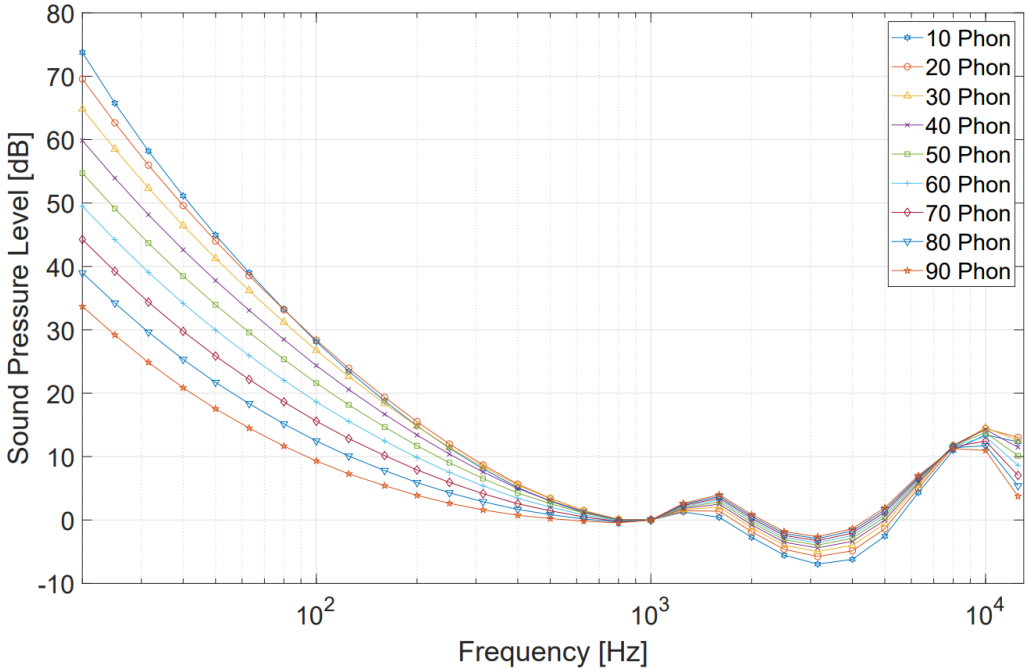
Seiring berkembangnya teknologi *audio*, permintaan akan sistem *audio* yang memiliki performa tinggi semakin meningkat[5]. Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam desain *filter Crossover* yang mampu memberikan distribusi frekuensi yang akurat dan respons yang cepat terhadap sinyal *input* [6]. *Filter* LR 24 dianggap mampu menjawab kebutuhan ini, namun belum banyak dilakukan penelitian mendalam terkait penerapannya pada *Subwoofer* dalam sistem *audio* secara menyeluruh [7].

Dalam sistem *audio*, *fidelity* suara yang dihasilkan sangat bergantung pada kemampuan komponen untuk memisahkan frekuensi dengan presisi, terutama pada frekuensi rendah yang ditangani oleh *Subwoofer*[8]. Meski *filter Crossover* telah banyak diterapkan, masih terdapat tantangan dalam perancangan *filter* yang mampu memastikan distribusi frekuensi yang jelas tanpa mengorbankan *fidelity* suara[7]. Permasalahan ini memunculkan kebutuhan untuk mengembangkan *filter Crossover* analog aktif yang efektif memisahkan frekuensi rendah dengan transisi yang halus pada titik *Crossover*, sebagaimana ditawarkan oleh desain *filter Linkwitz-Riley* orde ke-4.

Di sisi lain, meskipun *filter* pasif sering digunakan dalam sistem *audio* karena kesederhanaan desain dan biaya yang lebih rendah, terdapat beberapa keterbatasan dalam performanya[4]. *Filter* pasif cenderung memiliki efisiensi rendah pada frekuensi rendah, karena bergantung pada komponen seperti kapasitor dan induktor yang ukurannya besar dan sulit dioptimalkan untuk presisi yang tinggi. Selain itu, *filter* pasif juga sering mengalami kehilangan daya yang signifikan dan gangguan pada linearitas fase, yang dapat mengurangi kualitas suara secara keseluruhan. Oleh sebab itu, penting untuk menggunakan *filter Crossover* aktif dalam hal distribusi frekuensi, kompatibilitas dengan sistem *audio*, dan dampaknya terhadap kualitas suara, khususnya pada pengolahan frekuensi rendah yang kritis.

Kurva *Fletcher-Munson* (pada Gambar I.1) memberikan wawasan mendalam mengenai sensitivitas pendengaran manusia terhadap berbagai frekuensi pada tingkat tekanan suara yang berbeda[9][10]. Dalam konteks sistem *audio*, kurva ini menunjukkan bahwa telinga manusia lebih peka terhadap frekuensi menengah dibandingkan frekuensi rendah atau tinggi pada tingkat volume tertentu. Oleh karena itu, desain *filter Crossover*, khususnya untuk *Subwoofer*, harus

mempertimbangkan karakteristik ini agar distribusi frekuensi dapat disesuaikan dengan persepsi pendengaran manusia. Dengan menggunakan *filter Linkwitz-Riley* orde ke-4, transisi frekuensi dapat dilakukan secara halus, memungkinkan *Subwoofer* untuk menghasilkan frekuensi rendah yang mendalam dan alami, sekaligus mempertahankan keseimbangan tonal yang sesuai dengan kurva *Fletcher-Munson*. Hal ini penting untuk memastikan bahwa kualitas suara yang dihasilkan tidak hanya terdengar baik secara teknis, tetapi juga sesuai dengan sensitivitas pendengaran manusia.



Gambar I.1 Kurva *fletcher-munson* [10]

1.2 Perumusan masalah

Perumusan masalah yang diangkat pada penelitian ini yaitu bagaimana merancang *filter crossover* aktif *Linkwitz-Riley* 24 yang optimal untuk diaplikasikan pada *Subwoofer* dalam sistem *audio* guna meningkatkan kejelasan dan kedalaman suara pada frekuensi rendah. Selain itu, penelitian ini juga mempertanyakan apakah *filter Linkwitz-Riley* ini dapat meredam *noise* pada sinyal frekuensi yang tidak dilewatkan, dalam hal ini sinyal dengan frekuensi tinggi.

1.3 Tujuan dan sasaran penelitian

Tujuan penelitian dirumuskan untuk memberikan arah yang jelas dalam perancangan dan evaluasi sistem yang dikembangkan. Berikut adalah tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini:

1. Merancang *filter Crossover* analog aktif berbasis *Linkwitz-Riley* orde ke-4 (LR 24).
2. Mengevaluasi performa desain LR 24 pada *Subwoofer* untuk menghasilkan kualitas suara yang tinggi dan memastikan distribusi frekuensi yang mendekati.
3. Memberikan kontribusi pada pengembangan sistem *audio* yang lebih baik.

1.4 Pembatasan masalah

Pembatasan masalah dilakukan untuk memastikan sistem yang dirancang sesuai dengan lingkup yang dapat dicapai dan menghindari kompleksitas yang tidak perlu. Berikut adalah beberapa batasan masalah pada penelitian ini:

1. Penelitian ini hanya akan fokus pada perancangan dan implementasi *filter Crossover* analog aktif *Linkwitz-Riley* orde ke-4 (LR 24) yang digunakan pada *Subwoofer* dalam sistem *audio*.
2. Penelitian ini tidak akan membahas aspek desain fisik dari *Subwoofer* atau komponen sistem *audio* lainnya, melainkan akan berfokus pada karakteristik dan performa dari *filter Crossover* yang dirancang.
3. Rentang frekuensi yang akan dieksplorasi terbatas pada frekuensi yang dapat di dengar manusia (20 Hz – 20 kHz), terutama pada (20 Hz – 120 Hz) yang merupakan rentang frekuensi utama untuk *Subwoofer*.
4. Evaluasi performa *filter* akan dilakukan menggunakan *Pink noise* yang jika dilihat dari spektrum memiliki magnitudo yang sama per oktaf nya.
5. Penelitian ini tidak akan membahas perbandingan antara *filter Crossover* aktif dan pasif, sehingga analisis terbatas pada perbandingan *filter* analog aktif saja.

1.5 Sistematika penulisan

Penulisan laporan skripsi terdiri atas 5 bab dengan perincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan penjelasan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian, yang menjelaskan pentingnya penggunaan *filter* aktif *Linkwitz-Riley* 24 (LR24) dalam sistem *audio*, khususnya untuk *Subwoofer*. Selain itu, bab ini juga memuat rumusan masalah yang menjadi dasar pertanyaan dalam penelitian, tujuan dari penelitian yang ingin dicapai, batasan masalah yang menjelaskan ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan yang memberikan gambaran umum mengenai struktur laporan secara keseluruhan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan landasan teori yang menjadi dasar dari penelitian, termasuk penelitian-penelitian terdahulu yang relevan sebagai referensi. Dibahas pula secara mendalam teori tentang *filter* aktif, karakteristik *filter Linkwitz-Riley* orde 4 (LR24), serta teori dasar yang mendasari respons frekuensi, faktor kualitas (Q), dan frekuensi *cut-off*. Pada bab ini juga dijelaskan mengenai peran rangkaian RC (resistor-kapasitor) dalam pembentukan karakteristik *filter Linkwitz-Riley* orde 4, termasuk bagaimana nilai R dan C mempengaruhi posisi titik potong frekuensi dan *slope* dari *filter*. Penjelasan ini penting untuk memahami desain dan pemilihan komponen pada rangkaian *filter* yang dirancang.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan penjabaran mengenai bahan dan alat yang digunakan dalam proses penelitian dan perancangan, termasuk spesifikasi komponen elektronik yang digunakan seperti *Op-Amp*, resistor, kapasitor, dan catu daya. Selain itu, metode yang digunakan untuk merancang *filter* aktif *Linkwitz-Riley* orde 4 dijelaskan secara sistematis, mulai dari tahap perhitungan teori hingga realisasi fisik dan pengujian *filter*. Metodologi juga mencakup prosedur pengukuran dan analisis sinyal, serta teknik validasi hasil yang digunakan untuk membandingkan *filter* analog rancangan dengan *filter* digital bawaan alat DBx260.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil dari perancangan dan pengujian *filter Linkwitz-Riley* orde 4 yang telah dilakukan, termasuk data numerik dan grafik hasil pengujian seperti respons frekuensi dan spektogram. Hasil tersebut kemudian dianalisis untuk melihat apakah *filter* berhasil mencapai tujuan yang diinginkan, yakni memotong

sinyal frekuensi tinggi dan menguatkan sinyal frekuensi rendah pada *Subwoofer*. Pembahasan juga mencakup perbandingan performa *filter* analog rancangan dengan *filter* digital (BW24 dan BS24), serta analisis terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi performa, seperti jenis komponen, kualitas sumber daya, dan karakteristik *noise* dari tiap sistem.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, yaitu ringkasan hasil utama yang menjawab rumusan masalah dan pencapaian tujuan penelitian. Selain itu, bab ini juga memberikan saran untuk penelitian selanjutnya, baik dari segi peningkatan kualitas desain *filter*, pengujian yang lebih komprehensif, maupun pemanfaatan teknologi yang lebih mutakhir untuk menghasilkan sistem *audio* dengan *fidelity* lebih tinggi.