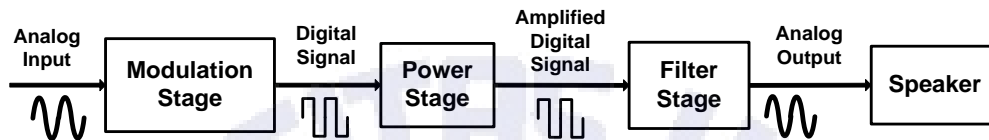


BAB II

LANDASAN TEORI

Pada bab ini penulis akan menjelaskan teori-teori penunjang utama dalam merancang tapis LC untuk penguat audio kelas D dengan tiga daya yang berbeda.

Blok diagram penguat audio kelas D dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok Diagram Penguat Audio Kelas D[1].

Bagian modulator berfungsi untuk memodulasi isyarat audio menjadi rentetan pulsa-pulsa yang akan mengandung frekuensi dari isyarat audio masukan dan frekuensi tinggi yang terjadi dikarenakan proses dari modulasi. Modulator merupakan hal yang berperan paling besar dibalik efisiensi yang tinggi dari penguat audio kelas D. Tanpa itu, transistor harus beroperasi di wilayah linier untuk periode waktu yang lebih lama dalam memperkuat sinyal masukan, sehingga dapat menyebabkan panas dan menjadi tidak efisien. Dengan memodulasi sinyal masukan, transistor dapat beroperasi jadi lebih cepat. Teknik modulasi yang digunakan sebagai modulator pada penguat audio kelas D adalah modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation/PWM*) dan modulasi sigma delta (*Sigma Delta Modulation/SDM*). Pada tugas akhir ini penulis menggunakan teknik modulasi lebar pulsa.

Bagian tingkat daya digunakan untuk memperkuat daya isyarat dari keluaran komparator. Isyarat keluaran komparator yang berupa deretan pulsa-pulsa akan mengendalikan komponen aktif MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors*) pada bagian tingkat daya sebagai saklar karna sifat MOSFET dekat dengan saklar ideal. MOSFET akan dikendalikan dalam dua kondisi saja yaitu saturasi ('*ON*') atau *cut-off* ('*OFF*'). Oleh karena itu, secara ideal tidak ada daya yang terbuang pada MOSFET. Hal inilah yang membuat penguat audio kelas D memiliki efisiensi yang tinggi bila dibandingkan dengan penguat audio kelas A, B, dan AB. Bagian penguat daya diwujudkan dengan penguat setengah jembatan (*half bridge*).

Setelah diperkuat, sinyal harus disaring terlebih dahulu sebelum diumpan ke *speaker*. Hal ini dikarenakan sinyal keluaran adalah gelombang pulsa termodulasi yang mengandung sejumlah besar frekuensi tinggi, bukan sinyal audio analog yang dapat berfungsi sebagai *output* ke *speaker*. Karena mengandung frekuensi tinggi, maka diperlukan tapis lolos bawah yang idealnya dapat memotong frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi dibawah frekuensi *cut-*

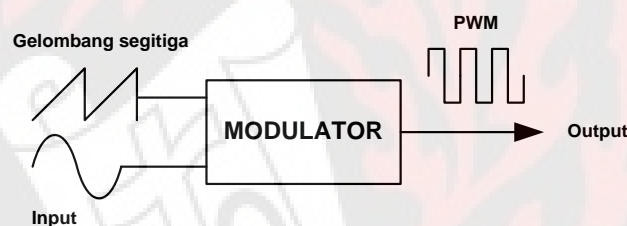
off. Frekuensi *cut-off* dipilih sehingga tapis akan memiliki efek minimal pada rentang frekuensi yang diinginkan sembari mengurangi kebisingan *switching*. Pada tugas akhir ini, tapis lolos bawah yang digunakan adalah tapis LC. Karena selain dapat memotong frekuensi tinggi tapis, LC juga dapat mengubah gelombang pulsa menjadi sinyal analog agar dapat diumpan ke *speaker*.

2.1. Modulasi Pada Penguat Audio Kelas D

Bagian modulator dari penguat audio kelas D dapat menghasilkan isyarat keluaran keluaran termodulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*, PWM) atau termodulasi rapat pulsa (*Pulse Sensity Modulation*, PDM). PWM dihasilkan dengan menjumlahkan sinyal masukan audio dengan gelombang segitiga. Sedangkan PDM merupakan keluaran teknik modulasi sigma delta (*Sigma Delta Modulation*, SDM).

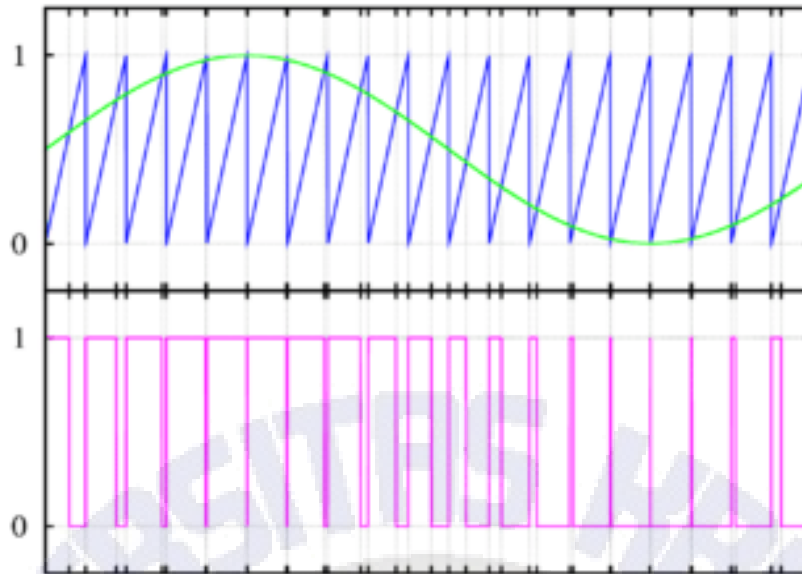
2.1.1. Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) adalah teknik mengubah sinyal masukan analog dalam bentuk pulsa lebar (*duty cycle*) dengan nilai amplitudo dan frekuensi tetap.



Gambar 2.2 Proses Modulasi PWM.

Teknik modulasi memerlukan sebuah generator gelombang segitiga dan komparator untuk menghasilkan sinyal PWM yang seimbang terhadap sinyal masukan. Modulasi dicapai dengan membandingkan sinyal masukan analog dan gelombang segitiga yang mempunyai frekuensi tinggi 5 hingga 50 kali dari sinyal audio[2]. Dalam setiap periode lebar pulsa dari sinyal PWM akan sebanding dengan sinyal masukan. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi yaitu antara 0 % hingga 100 %.



Gambar 2.3 Keluaran sinyal PWM. Warna hijau menunjukkan sinyal audio masukan, warna biru menunjukkan sinyal segitiga, dan warna ungu menunjukkan sinyal PWM.

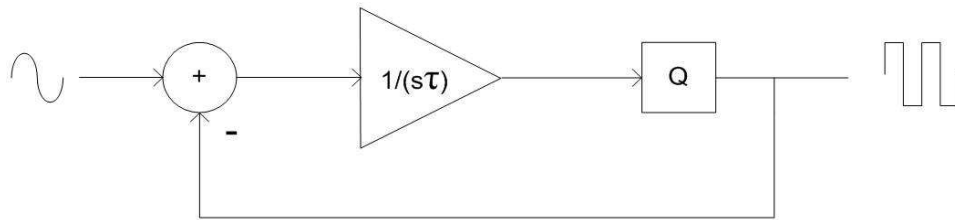
Dapat dilihat pada Gambar 2.3, sinyal berwarna ungu merupakan sinyal PWM hasil dari proses modulasi dan memiliki *duty cycle* yang bervariasi. Ketika amplitudo gelombang sinus bernilai maksimal maka nilai nilai bagian *high* sinyal PWM semakin lebar dan sebaliknya.

Sinyal PWM tersebut digunakan sebagai penggerak transistor *switching ON* dan *OFF* sesuai dengan lebar pulsanya. Saat nilai sinyal masukan lebih besar dari gelombang segitiga maka keluarannya bernilai *high*. Saat sinyal masukan lebih rendah dari gelombang segitiga maka *outputnya* bernilai *low*[2]. Pada *output* sebelum diumpan ke *speaker*, sinyal PWM dimodulasi kembali menggunakan tapis lolos bawah.

Metode PWM memiliki kelebihan seperti menghasilkan total distorsi harmonik yang rendah pada tegangan keluaran tanpa filter yang rumit. Memiliki desain lebih sederhana dan ekonomis terutama pada sistem yang mempunyai sistem pensaklaran yang cepat.

2.1.2. Sigma Delta Modulation (SDM)

Sigma Delta Modulation (SDM) merupakan metode modulasi yang digunakan dalam modulator penguat kelas D untuk mengubah isyarat audio masukan menjadi isyarat *Pulse Density Modulation (PDM)*. Di dalam SDM terjadi proses pembentukan derau (*noise-shaping*) di dalamnya untuk menekan derau pada frekuensi pada pita tertentu.



Gambar 2.4 Blok Diagram SDM.

Modulasi sigma delta (SDM) tersusun dari pengkuantisasi (Q) dan tapis ($1/sT$) di depan pengkuantisasi kemudian keluaran hasil kuantisasi diumpan balik seperti terlihat pada Gambar 2.4. Teknik SDM dapat membentuk *noise* hasil kuantisasi sehingga jauh dari *signal band* yang diinginkan. Secara umum, operasi modulasinya dengan cara mengurangi hasil *sampling* kuantisasi *error* dari *sampling signal* yang dihasilkan sebelumnya (*feedback*) dan seterusnya sampai berulang-ulang hingga kuantisasi *error* yang diperoleh menjadi nol.

Dalam penguat audio, akan ideal untuk fungsi transfer sinyal selurus mungkin sepanjang pita audio dan fungsi transfer derau untuk mendorong derau sejauh mungkin dari pita audio. *Noise shaping* dapat meningkatkan kualitas suara dengan mengurangi derau kuantisasi dalam pita audio[2]. Frekuensi termodulasi juga dapat mempengaruhi dengan menentukan penempatan fungsi transfer dalam domain frekuensi. Frekuensi modulasi yang tinggi akan mendorong derau ke frekuensi yang lebih tinggi, dan semakin mengurangi pita audio. Sinyal PWM dimodulasi kembali menjadi sinyal analog menggunakan filter lolos bawah sebelum diumpan ke *speaker*. Semakin tinggi orde tapis, SDM akan memberikan keuntungan pada kenaikan (*signal to noise* rasio) SNR hal ini dikarenakan terjadinya proses *noise-shaping* dimana derau akan dipindahkan pada pita frekuensi yang jauh lebih tinggi dari pita audio. Namun SDM dengan orde tinggi (lebih dari 2) menjadi tidak stabil karena adanya umpan balik dari pengkuantisasi yang bersifat tidak linear.

2.2. Tingkat Daya dengan MOSFET

Pada tugas akhir ini mosfet dipakai sebagai komponen aktif yang dipakai pada bagian tingkat daya untuk menguatkan isyarat pulsa keluaran modulator.

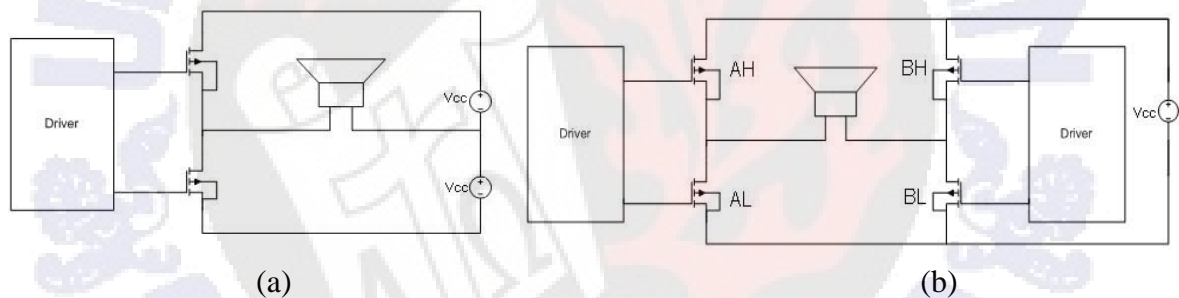
2.2.1. MOSFET

MOSFET mempunyai impedansi masukan yang sangat tinggi dan menyerap daya searah yang kecil. Hal ini yang menyebabkan MOSFET sangat efisien dalam rangkaian

berdaya kecil. Tidak seperti transistor sambungan dua kutub (*bipolar junction transistor*, BJT), MOSFET tidak membutuhkan pengendali arus yang besar. Demikian pula MOSFET mempunyai kecepatan operasi yang tinggi dibandingkan dengan BJT, sehingga MOSFET cocok digunakan dalam aplikasi pensaklaran (*switching*) dengan frekuensi yang cukup tinggi.

Pada penguat audio MOSFET akan bekerja dalam dua kondisi. Yang pertama adalah MOSFET bekerja dalam kondisi *cut-off* ('OFF'). Pada kondisi *cut-off*, MOSFET tidak beroperasi, hal ini terjadi ketika $V_{DS} = V_{DD}$ dan nilai arus *drain-source* (I_{DS}) idealnya akan bernilai 0[3]. Pada daerah ini juga dapat dianalogikan sebagai saklar tertutup. Yang kedua adalah MOSFET bekerja dalam kondisi saturasi ('ON'), dimana MOSFET akan mengalirkan arus secara maksimal dari *drain-source*, dan V_{DS} idealnya bernilai 0 V[3]. Pada saat kondisi ini terjadi disipasi daya pada MOSFET yang akan terbuang menjadi panas, oleh karena itu diperlukan pendingin (*heat-sink*).

Sebagai penguat bagian akhir, ada dua konfigurasi yang dapat digunakan yaitu *half bridge* (setengah jembatan) dan *full bridge* (jembatan penuh). Perbedaan kedua konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 (a) Konfigurasi *Half Bridge* dan (b) Konfigurasi *Full Bridge*.

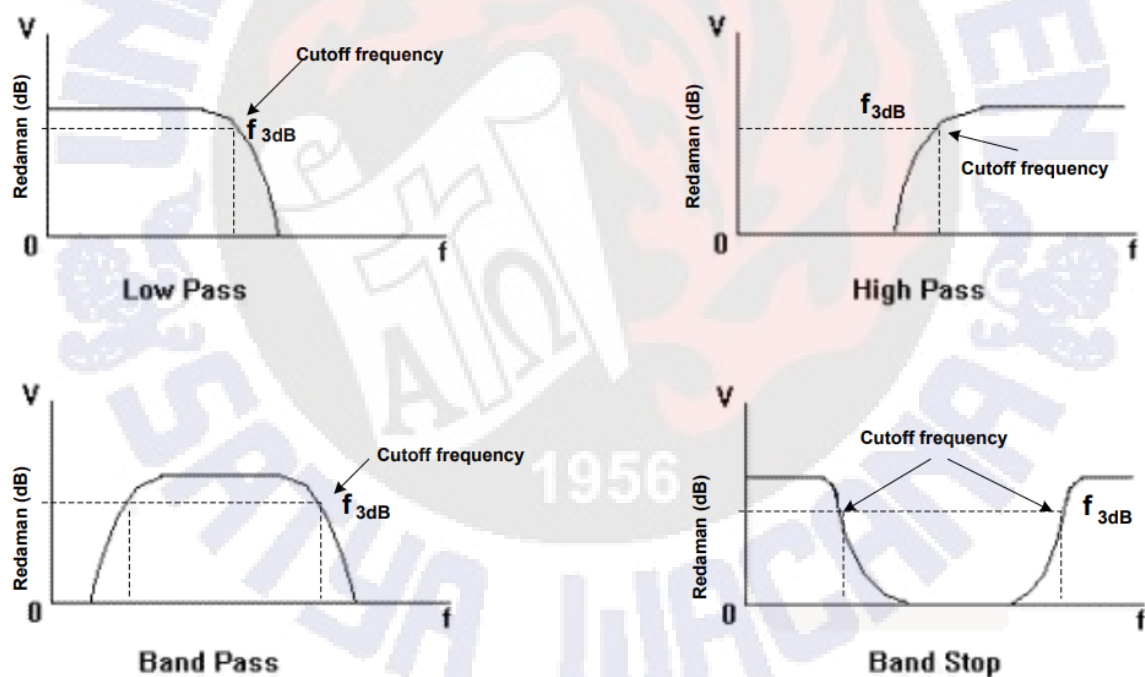
Konfigurasi setengah jembatan terdiri dari dua MOSFET atas dan bawah yang terhubung dan beroperasi secara bergantian. Konfigurasi jembatan penuh terdiri dari empat MOSFET. Konfigurasi setengah jembatan memiliki dua aras, sedangkan pada konfigurasi jembatan penuh dapat mencapai tiga aras yang berbeda, bagian positif, negatif, dan netral[3]. Keuntungan dari jembatan penuh adalah distorsi harmonik teratur (rata) dan tidak memiliki *offset* DC. Distorsi harmonik negatif dapat mempengaruhi kualitas sinyal keluaran, *offset* DC dapat merusak *speaker*[3].

2.3. Tapis

Tapis (*filter*) adalah sebuah rangkaian yang dirancang agar dapat mengalirkan suatu pita frekuensi tertentu dan menghilangkan frekuensi yang berbeda. Istilah lain dari tapis adalah

rangkaian yang dapat memilih frekuensi agar dapat mengalirkan frekuensi yang diinginkan, menahan, dan atau membuang frekuensi yang lain. Pita frekuensi yang dapat dilewatkan disebut *Pass Band* dan pita frekuensi yang tidak dapat dilewatkan disebut *Stop Band*.

Tapis bisa bersifat aktif atau pasif. Perbedaan dari komponen aktif dan pasif adalah pada komponen filter aktif menggunakan operasional amplifier dalam rangkaianannya sedangkan filter pasif tidak. Kelebihan dari filter aktif adalah ukurannya lebih kecil, ringan, dan lebih fleksibel dalam perancangannya. Sedangkan kelemahannya yaitu pada komponen menghasilkan panas, terdapat pembatasan frekuensi dari komponen yang digunakan sehingga pengaplikasian untuk frekuensi tinggi terbatas. Kelebihan dari rangkaian filter pasif ini adalah tidak banyak *noise* (sinyal gangguan yang tidak diinginkan) karena tidak ada penguatan, dan digunakan untuk frekuensi tinggi. Sedangkan kerugiannya adalah tidak dapat memperkuat sinyal. Berdasarkan pita frekuensi yang dilewatkan, filter dibedakan menjadi empat, yaitu *Low Pass Filter* (LPF), *Band Pass Filter* (BPF), *High Pass Filter* (HPF), dan *Band Stop Filter* (BSF).

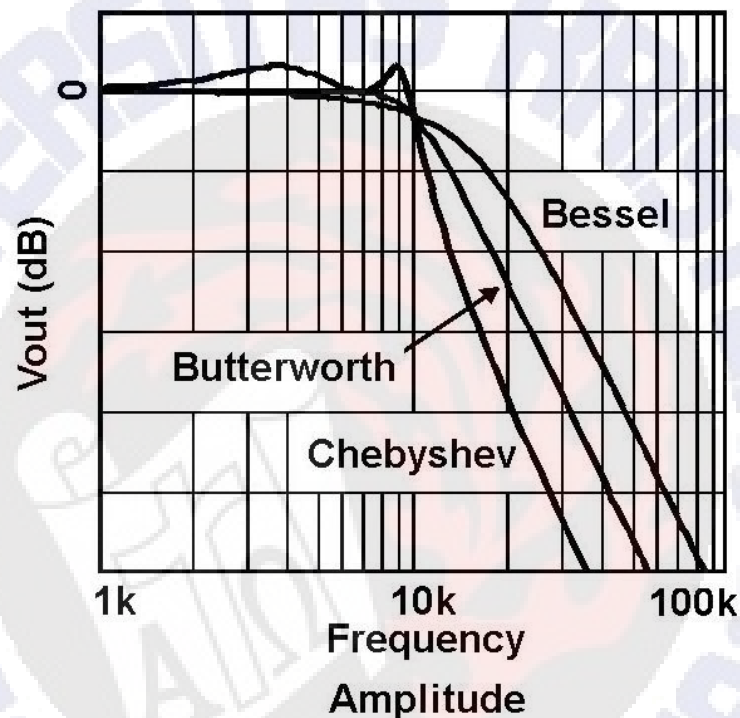


Gambar 2.6 Tanggapan Frekuensi Berdasarkan Tipe Filter[2].

Dari Gambar 2.6, *Low Pass Filter* (LPF) merupakan filter yang melewatkan sinyal frekuensi rendah dan menghambat frekuensi tinggi. Batas frekuensi yang dilewatkan pada LPF adalah nilai frekuensi *cut-off*. *High Pass Filter* (HPF) merupakan filter yang melewatkan frekuensi tinggi, tetapi mengurangi amplitudo yang lebih rendah daripada frekuensi *cut-off*. *Band Pass Filter* (BPF) merupakan perangkat yang melewatkan frekuensi yang berada diantara frekuensi batas bawah (f_L) hingga frekuensi batas atas (f_H). Filter ini dapat dibuat dengan

menggabungkan LPF dan HPF. *Band Stop Filter* (BSF) atau disebut juga *Band Reject Filter* adalah filter yang menahan frekuensi dengan rentang nilai di atas frekuensi batas bawah (f_L) dan di bawah frekuensi batas atas (f_H), dan akan melewatkan sinyal dengan rentang nilai frekuensi di luar batas bawah (f_L) dan batas atas (f_H). Pada penguat audio kelas D, filter berfungsi untuk memotong frekuensi tinggi, maka filter yang digunakan adalah LPF.

Berdasarkan bentuk respon frekuensi terhadap *gain*, LPF dapat dibedakan menjadi: Tapis *Bessel* (*Maximally Flat Time Delay*), Tapis *Chebyshev* (*Tchebycheff*), dan Tapis *Butterworth* (*Maximally Flat*). Tanggapan frekuensi dapat dilihat pada Gambar 2.7.

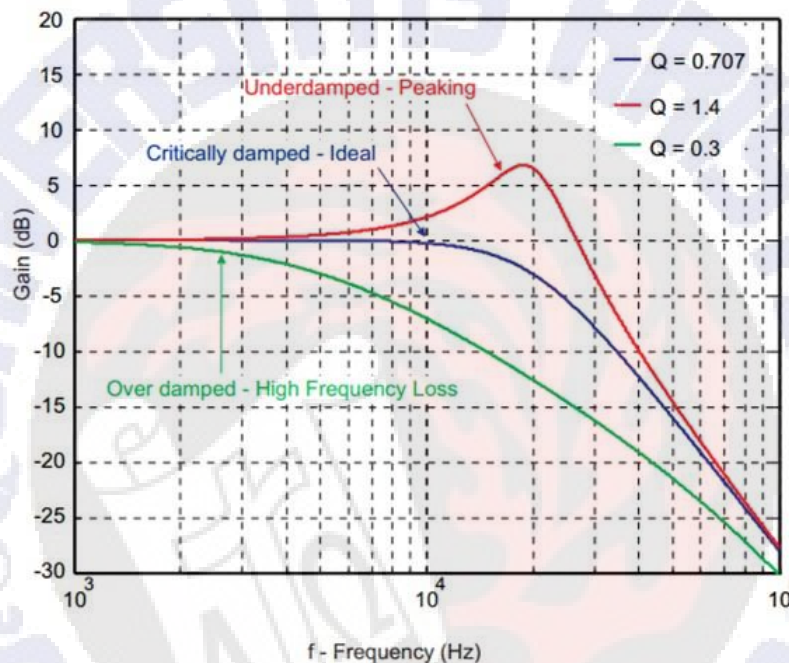


Gambar 2.7 Tanggapan Frekuensi *Bessel*, *Chebyshev*, dan *Butterworth*[2].

Dari Gambar 2.7, Tapis *Bessel* mempunyai respon fase yang linear melalui rentang frekuensi yang lebar, yang menghasilkan *delay* yang konstan dalam rentang frekuensi tersebut. *Gain passband* pada *Bessel* tidak serata seperti *Butterworth*, dan transisi dari *passband* ke *stopband* tidak setajam tapis *Chebyshev*. Tapis *Chebyshev* menghasilkan *roll-off* yang lebih tinggi di atas frekuensi *cut-off*. *Gain passband* tidak monoton, tetapi mengandung riak (*ripple*) dari magnitud konstan. Untuk orde tapis yang diberikan, semakin tinggi riak *passband*, semakin tinggi pula *roll-off* tapis. Tapis *Butterworth* tergolong jenis tapis yang biasa digunakan untuk merancang tapis dengan respon amplitud yang datar (*flat*) di daerah frekuensi *passband*-nya. Tidak ada riak atau *ripple* pada *passband*. Tapis yang digunakan pada penguat audio ini adalah tapis *Butterworth*.

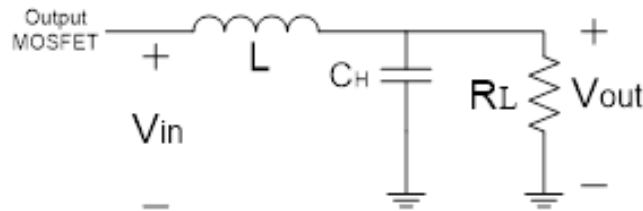
2.3.1. Tapis LC

Tapis LC merupakan tapis lolos bawah atau *low pass filter* (LPF) *Butterworth* yang digunakan untuk meneruskan frekuensi rendah dan meredam sinyal berfrekuensi tinggi. Tapis LC terdiri dari Induktor dan Kapasitor. Sinyal keluaran dari LPF *butterworth* memiliki respon yang bervariasi dengan impedansi beban *speaker*. Impedansi beban menentukan rasio redaman keluaran dari tapis dan diklasifikasikan sebagai *overdamped*, *critically damped*, atau *underdamped*. Pengaruh faktor kualitas terhadap respon frekuensi dapat di lihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengaruh Faktor Kualitas (Q) pada Respon Frekuensi[2].

Hal ini penting untuk memahami jenis impedansi beban *speaker* dan nilai L dan C yang sesuai dengan yang diharapkan. Tapis LC yang digunakan adalah orde dua yang memiliki respon *critically damped* dan *passband*-nya datar[4]. Dapat dilihat pada Gambar 2.8 penggunaan tapis LC dengan puncak yang berlebihan, seperti respon tapis *underdamped*. Pada frekuensi puncak umumnya terdengar kasar untuk telinga manusia. Namun, pada tapis *overdamped* mengakibatkan redaman frekuensi tinggi pita audio. Rangkaian tapis LC dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Rangkaian Tapis LC.

Dalam memilih nilai komponen untuk tapis LC orde dua, ada dua faktor yang perlu diperhatikan yaitu frekuensi *cut-off* dan faktor kualitas (Q)[4]. Tapis dengan Q yang tinggi memiliki *bandwith* atau lebar frekuensi yang sempit dan tegangan output yang besar, sebaliknya tapis dengan Q yang rendah memiliki lebar frekuensi yang lebar dan tegangan output yang kecil. Jika frekuensi *cut-off* (f_c) sebesar 20 kHz, induktor (L), dan kapasitor (C), maka menentukan nilai komponen yang akan digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

$$f_c = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} \quad (2.1)$$

$$Q = R_L \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.2)$$

Jika diketahui faktor kualitas $Q = 0,707$ atau $Q = 1/\sqrt{2}$ [4]. Dengan mengganti nilai Q ke dalam persamaan frekuensi *cut-off* dan faktor kualitas, didapat persamaan untuk mencari nilai L dan C :

$$L = \frac{R_L \times \sqrt{2}}{\omega_0} \quad (2.3)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \times R_L \times \sqrt{2}} \quad (2.4)$$

dimana :

$$C_H = \frac{C}{2} \quad (2.5)$$

diketahui :

ω_0 = Frekuensi sudut

$\omega_0 = 2\pi f_c$

f_c = Frekuensi Cut-Off (Hz)

L = Induktor (H)

C_H = Kapasitor (F)

R_L = Beban Impedansi Penyuaara (Ohm)

2.3.2. Induktor

Induktor adalah sebuah komponen elektronika pasif yang dapat menyimpan energi pada medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melintasinya. Kemampuan induktor untuk menyimpan energi magnet ditentukan oleh Induktansinya, dalam satuan Henry (H). Sebuah induktor yang ideal memiliki induktansi, tanpa resistansi atau kapasitansi, dan tidak memboroskan daya. Induktor inti toroida memiliki beberapa kelebihan seperti medan magnet yang tertutup, sehingga medan magnet yang dihasilkan oleh induktor tidak akan menginterferensi perangkat elektronik lain. Induktor inti toroid memiliki medan magnet yang kuat, sehingga dapat menghemat jumlah lilitan dalam pembuatannya. Pada perancangan ini, induktor yang digunakan adalah inti toroida.

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 r^2}{D} \quad (2.6)$$

dimana :

L = induktansi (H)

μ_0 = permeabilitas vakum

μ_r = permeabilitas relatif bahan inti

N = jumlah lilitan

r = jari-jari gulungan (m)

D = diameter keseluruhan (m)

2.3.3. Signal to Noise Ratio (SNR)

SNR (*Signal to noise Ratio*) adalah parameter yang menggambarkan rasio daya sinyal terhadap daya *noise* (derau) dalam satuan sistem desibel (dB)[3]. Secara matematis, nilai SNR dapat dicari menggunakan rumus:

$$\text{SNR} = 20 \log \frac{V_o}{V_{\text{noise}}} \quad (2.7)$$

Secara umum, SNR mengukur perbedaan antara sinyal audio dan tingkat kebisingan. Pada tingkat kebisingan terdapat beberapa jenis kebisingan yang dapat menghasilkan “desisan” yang dapat didengar dalam penggunaan daya tinggi. Salah satu penyebab kebisingan adalah eksitasi termal pada penguat audio. MOSFET yang memiliki efisiensi tinggi, dapat memiliki eksitasi termal secara acak dalam silikon yang dapat menyebabkan arus kecil yang tidak diinginkan mengalir. Demikian pula, jika ada kebisingan pada sinyal *input*, itu akan diperkuat dan akan berkontribusi pada tingkat kebisingan sistem, mengurangi SNR. Karena itu penting

untuk memiliki SNR yang tinggi, karena SNR yang lebih tinggi memungkinkan kualitas *output* yang lebih tinggi.

2.3.4. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan nilai persentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamentalnya[3]. Semakin besar persentase THD ini menyebabkan semakin besarnya risiko kerusakan alat akibat harmonisa yang terjadi pada arus maupun tegangan. Nilai THD yang diijinkan secara internasional maksimal berkisar 5% dari tegangan atau arus frekuensi fundamentalnya[3]. Musik terbuat dari frekuensi fundamental dan harmonis. Sebagai contoh, biola memainkan catatan tengah adalah menghasilkan frekuensi fundamental dari 440Hz atau siklus per detik. Hal ini juga mereproduksi harmonisa dari frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar, seperti 880 Hz, 1220 Hz, 1760 Hz dan sebagainya.

Harmonisa adalah distorsi periodik dari gelombang sinus tegangan, arus atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan di luar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental (50 Hz atau 60 Hz). THD diperoleh dengan membandingkan sinyal output dari penguat dengan sinyal input dan mengukur perbedaan dalam frekuensi yang harmonis antara keduanya. Untuk mengetahui nilai THD digunakan persamaan di bawah ini.

$$THD = THD_{OUT} - THD_{IN} \quad (2.8)$$