

Rancang Bangun Modul Low Pass Filter (LPF) Orde 1 dan Orde 2 Sebagai Penunjang Prkatikum Rangkaian Elektronika dan Bengkel Elektronika Komunikasi

Eko Supriyanto ¹, Agus Fitriyanto ², Yasmin Nurfaizah ³

¹ Laboratorium Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

Email: eko@staff.pens.ac.id

² Laboratorium Pengukuran Listrik, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

Email: agusf@staff.pens.ac.id

³ Pendidikan IPA, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya.

Email: yasminfaizah25@gmail.com

ABSTRAK

Filter merupakan salah satu rangkaian yang sangat dibutuhkan dalam kehidupan sehari-hari. Baik didalam bidang elektronika maupun telekomunikasi. Bahkan tidak jarang rangkaian filter dibutuhkan juga didunia pendidikan dan kedokteran.

Untuk mengetahui dasar dari rangkaian filter dan prinsip kerja rangkaian filter maka seorang mahasiswa dituntut untuk bisa merangkai dan mempergunakan rangkaian filter sesuai dengan tujuannya. Tidak hanya mengetahui secara teori tetapi juga bisa mengaplikasikan dalam sebuah rangkaian elektronika.

Pada penelitian ini perancangan rangkaian filter, khususnya Low Pass Filter, dengan orde yang berbeda-beda diharapkan bisa memberikan gambaran dasar rangkaian filter bagi mahasiswa, baik tingkat dasar maupun tingkat lanjut. Apalagi komponen-komponen yang dipergunakan mudah didapatkan di pasaran maupun di laboratorium. Selain itu diharapkan dengan adanya hasil dari penelitian ini, bisa dikembangkan sebagai modul praktikum Rangkaian Elektronika dan Bengkel Elektronika Komunikasi dalam hal perencanaan, perakitan dan pengukuran karakteristik dari filter.

Kata kunci : Filter, Low Pass Filter, Filter Audio, Desibel, Semilog.

Pendahuluan

1. 1. Latar Belakang

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya merupakan sekolah berbasis ilmu terapan yang telah mengarahkan kurikulumnya kearah praktisi. Oleh karena itu, alat penunjang praktikum memiliki peranan sangat penting sebagai wadah pembelajaran mahasiswa politeknik. Praktikum rangkaian elektronika dan bengkel elektronika komunikasi adalah salah satu praktikum yang sangat mendasar sebelum menuju jenjang praktikum berikutnya. Disini mahasiswa dikenalkan bagaimana penggunaan instrumentasi dan juga berbagai macam sinyal. Diantaranya adalah bagaimana merakit dan mengukur karakteristik dari sebuah rangkaian filter.

Low pass filter (LPF) atau dalam bahasa Indonesia dikenal dengan sebutan tapis lolos bawah merupakan salah satu dari jenis rangkaian filter frekuensi. Ada banyak tipe rangkaian filter frekuensi yang sering digunakan terutama pada sistem audio sound sistem.

Setiap rangkaian filter frekuensi memiliki fungsi dan karakteristik tersendiri yang berbeda dengan rangkaian filter lainnya. Low pass filter adalah rangkaian filter frekuensi yang berfungsi untuk meloloskan sinyal frekuensi rendah dan menahan atau memblokir sinyal frekuensi tinggi. Dengan bisa membandingkan ordo LPF mahasiswa diharapkan bisa merancang sebuah filter dengan kecuraman yang diharapkan.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka permasalahan yang dibahas yaitu :

1. Merencanakan frekuensi kerja yang diperlukan oleh filter.
2. Merakit dan mengukur karakteristik output dari rangkaian filter yang telah direncanakan.

1.3 Metodologi Pengumpulan Data

Pada penelitian ini akan menggunakan beberapa metode untuk mencapai hasil yang baik dan sesuai yang diharapkan, antara lain:

1. Rumusan Masalah
Perumusan masalah dilakukan untuk menentukan segala masalah yang ada pada penelitian ini.
2. Studi literatur
Studi literatur berguna untuk mengetahui dasar – dasar teori pendukung dan spesifikasi bahan yang digunakan. Referensi literatur berasal dari buku, jurnal, laman internet, buku manual dan datasheet.
3. Simulasi dan perancangan
Simulasi dilakukan untuk menghasilkan suatu rancangan penelitian yang baik dan nantinya diimplementasikan ke dalam perancangan sistem dalam bentuk alat.
4. Uji coba sistem dan analisis
Uji coba dilakukan untuk mengetahui kekuatan, kehandalan, kestabilan, ketepatan dan kualitas dari sistem yang dirancang dengan beragam macam kondisi. Analisis dilakukan untuk memetakan data hasil uji coba sekaligus menarik kesimpulan dari data yang dipetakan.
5. Penyusunan Laporan
Penyusunan laporan berguna untuk mendokumentasikan seluruh kegiatan dan data yang didapat dalam peneliti

Tinjauan Pustaka

2.1. Rangkaian Low Pass Filter

Bentuk rangkaian low pass filter yang umum biasanya tersusun dari rangkaian RC sederhana dengan kapasitor sebagai output. Jadi, low pass filter yang kita bahas dikenal dengan rangkaian low pass filter RC. Contoh dari rangkaian low pass filter RC dapat dilihat di Gambar.(1).

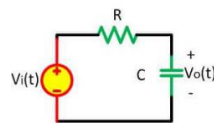
Sebuah rangkaian sederhana dari low pass filter dibangun menggunakan sebuah resistor dan kapasitor. Berikut ini merupakan contoh rangkaian filter low pass sederhana yang hanya memiliki satu komponen reaktif kapasitor. Jenis rangkaian seperti di bawah ini dikenal sebagai rangkaian filter satu kutub atau satu orde.

Resistor pada rangkaian diatas tidak berpengaruh terhadap penyaringan frekuensi yang dilakukan oleh rangkaian. resistor hanya berfungsi untuk membatasi aliran arus listrik yang melintasi kapasitor. Untuk melakukan penyaringan frekuensi dilakukan oleh kapasitor.

Kapasitor merupakan komponen yang sensitif terhadap perubahan frekuensi arus ac yang melewatinya. Kapasitor akan memberikan respon terhadap arus yang melewatinya. Respon kapasitor ini disebut sebagai reaktansi kapasitif kapasitor.

Nilai reaktansi kapasitif kapasitor akan dipengaruhi oleh frekuensi arus atau sinyal listrik yang melewatinya. Dimana reaktansi kapasitif pada kapasitor berbanding terbalik dengan frekuensi arus yang diterapkan kepadanya.

Semakin rendah frekuensi arus listrik maka perlawanan kapasitor terhadap arus semakin berkurang sehingga dapat meloloskan sebagian besar arus listrik dengan frekuensi rendah. Demikian sebaliknya, makin tinggi frekuensi arus listrik yang melewatinya maka akan semakin besar perlawanan kapasitor untuk menghambat arus listrik tersebut.



Gambar 1. Rangkaian LPF RC

Nilai reaktansi kapasitif kapasitor dinyatakan dalam rumus di bawah ini :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f c}$$

Dimana :

X_C adalah reaktansi kapasitid (Ohm)

f adalah frekuensi (Hz)

c adalah kapasitansi kapasitor (Farad)

Kita juga dapat menghitung besar resistensi atau hambatan pada rangkaian dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$$

Dimana :

Z adalah nilai impedansi rangkaian

R adalah nilai resistensi resistor

X_c adalah reaktansi kapasitif

2.2. Perhitungan tegangan output

Rangkaian filter frekuensi pada dasarnya merupakan sirkuit pembagi atau penurunan tegangan. Hanya saja penurunan tegangan yang dilakukan oleh rangkaian sangat selektif. Karena itu besar tegangan output yang keluar dari rangkaian tidak akan sama dengan tegangan input. Hal ini dipengaruhi oleh nilai dari kedua komponen resistor dan kapasitor yang digunakan.

Untuk menghitung tegangan output rangkaian low pass filter satu orde seperti diatas, dapat menggunakan rumus seperti berikut ini :

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Karena kita tahu :

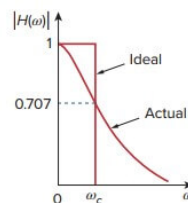
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \text{ Maka } V_{out} = V_{in} \times \frac{X_C}{Z}$$

Fungsi transfer low pass filter RC menjadi

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C}$$

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Ingat bahwa $H(0)=1$, $H(\infty)=0$. Kita dapat lihat plot dari $|H(\omega)|$ di Gambar.(2) beserta karakteristik idealnya.



Gambar 2. Karakteristik LPF

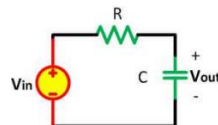
Pada frekuensi setengah-daya, yang mana ekuivalen dengan frekuensi sudut pada plot Bode tetapi dalam istilah filter dikenal dengan frekuensi cutoff, ω_c . Nilai ini dapat diperoleh dengan mengatur besar $H(\omega)$ setara dengan $1/\sqrt{2}$. Jadi,

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_c^2 R^2 C^2}}$$

atau

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

Jika kapasitor bekerja sebagai output:



Gambar 3. Rangkaian LPF RC

Fungsi transfer pada domain s:

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1/sC}{1/sC + R} = \frac{1}{1 + sCR}$$

Jika $s=j\omega$, maka fungsi transfer menjadi

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega CR}$$

Jadi respon frekuensi:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$$

$$\angle H(j\omega) = -\tan^{-1}(\omega CR)$$

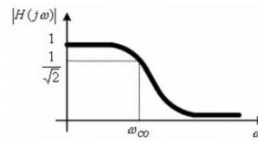
Grafik untuk besar respon frekuensi:

Ketika:

$$\omega = 0 \rightarrow |H(j\omega)| = 1$$

$$\omega = \infty \rightarrow |H(j\omega)| = 0$$

$$\omega = \frac{1}{CR} \rightarrow |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{cut-off frequency}$$



Gambar 4. Grafik respon frekuensi

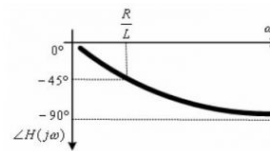
Respon frekuensi, grafik domain fase

Ketika:

$$\omega = 0 \rightarrow \angle H(j\omega) = 0^\circ$$

$$\omega = \infty \rightarrow \angle H(j\omega) = -90^\circ$$

$$\omega = \frac{1}{CR} \rightarrow \angle H(j\omega) = -45^\circ \rightarrow \text{cut-off frequency}$$



Gambar 5. Grafik domain fase

Adalah hal yang umum untuk menyebut frekuensi cutoff dengan frekuensi roll off.

Sebuah low pass filter juga dapat dibentuk ketika output dari rangkaian RL berada di resistor. Tentunya banyak rangkaian yang dapat berperan sebagai low pass filter.

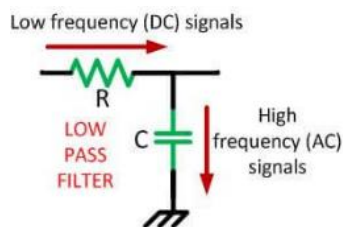
Perlu diingat bahwa, Frekuensi cutoff adalah frekuensi dimana fungsi transfer H turun sebesar 70.71% dari nilai maksimumnya. Hal ini juga dianggap sebagai frekuensi saat daya terdisipasi dalam rangkaian sebesar setengah dari nilai maksimum.

Seperti namanya, low pass filter sering digunakan untuk menahan atau melawan sinyal frekuensi tinggi dan mengijinkan sinyal frekuensi rendah untuk lewat. Contohnya jika kalian menginginkan batas frekuensi sinyal 50Hz ke bawah, maka sinyal dengan 50Hz ke atas akan diblokir.

Kita dapat dengan mudah membuat low pass filter menggunakan resistor dan kapasitor atau induktor. Low pass filter yang menggunakan resistor dan kapasitor disebut low pass filter RC. Rangkaian low pass filter yang menggunakan resistor dan induktor disebut low pass filter RL.

2.3. Low Pass Filter RC

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, sebuah low pass filter RC adalah rangkaian yang dibentuk dari resistor dan kapasitor yang melewatkan sinyal frekuensi rendah dan memblokir sinyal frekuensi tinggi. Hal yang sangat mudah untuk membuat low pass filter RC, kita hanya perlu menggunakan resistor terhubung seri dengan sumber dan kapasitor terhubung paralel. Kalian dapat melihat low pass filter RC di bawah:



Gambar 6. LPF RC

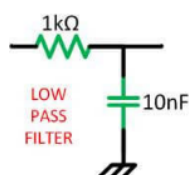
Setelah melihat rangkaian di atas, kita perlu menganalisa beberapa hal tentang bagaimana rangkaian bekerja. Kapasitor merupakan komponen reaktif dan menghasilkan resistansi yang sangat tinggi terhadap sinyal frekuensi rendah, terutama untuk sinyal DC. Jika kalian bertanya kenapa, maka kalian dapat mempelajari tentang kapasitor pada rangkaian dc. Penjelasan paling sederhana dapat dilihat dari materialnya, sepasang piringan dielektrik dengan sedikit celah di antara keduanya. Sinyal frekuensi rendah atau sinyal DC tidak dapat melalui jalur open-circuit.

Tetapi berbeda dengan frekuensi tinggi. Kapasitor memberikan resistansi rendah untuk sinyal frekuensi tinggi. Jadi dengan dua karakteristik ini kita menyimpulkan: Kapasitor akan memblokir sinyal frekuensi untuk masuk, membuat sinyal langsung mengalir ke bagian rangkaian selanjutnya. Sinyal frekuensi tinggi akan mengalir melalui kapasitor dan tidak dapat mengalir ke bagian rangkaian selanjutnya.

Ingat bahwa arus akan mengalir melalui jalur dengan resistansi terkecil. Jadi sinyal frekuensi tinggi akan memilih untuk mengalir melalui kapasitor, bukan ke bagian rangkaian selanjutnya, sedangkan frekuensi rendah akan mengalir ke bagian rangkaian selanjutnya karena resistansi tinggi dari kapasitor.

2.4. Cara Membuat Low Pass Filter RC

Setelah mempelajari bagaimana cara kerjanya, kita akan mempelajari cara membuatnya. Rangkaian akan tetap sama, resistor terhubung paralel dengan kapasitor. Sebagai contoh, kita akan menggunakan kapasitor 10nF dan resistor 1k ohm. Rangkaian akan menjadi seperti di bawah:



Gambar 7. LPF RC

Rumus untuk frekuensi cutoff low pass filter RC sangat sederhana. Untuk frekuensi cutoff rangkaian low pass filter RC dapat dihitung dari:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Menggunakan nilai dari contoh rangkaian di atas, frekuensi cutoff low pass filter menjadi:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$= \frac{1}{2(3.14)(1k\Omega)(10nF)}$$

$$= 15,923\text{Hz}$$

kurang lebih 15.9KHz.

Hal ini berarti rangkaian low pass filter RC di atas akan memblokir sinyal dengan 15.9KHz atau lebih. Sinyal dengan frekuensi 15.9KHz dan di bawahnya akan dengan mudah mengalir melalui filter.

Besarnya penguatan tegangan (G) pada filter pasif yang ideal maksimum adalah $1 = 0\text{dB}$ yang hanya terjadi pada frekuensi sinyal input dibawah frekuensi cut-off (f_c). Penguatan tegangan (G) filter LPF RC pasif dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut.

$$G = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|$$

Dan penguatan tegangan (G) LPF RC dapat dituliskan dalam satuan dB sebagai berikut.

$$G = 20\log \frac{V_{out}}{V_{in}} = 20\log \frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

Pada filter lolos bawah (low pass filter ,LPF) terdapat beberapa karakteristik mendasar sebagai berikut. Pada saat frekuensi sinyal input lebih rendah dari frekuensi cut-off (f_c) ($f_{in} \ll f_c$) maka penguatan tegangan / Gain (G) = 1 atau $G=0\text{dB}$.

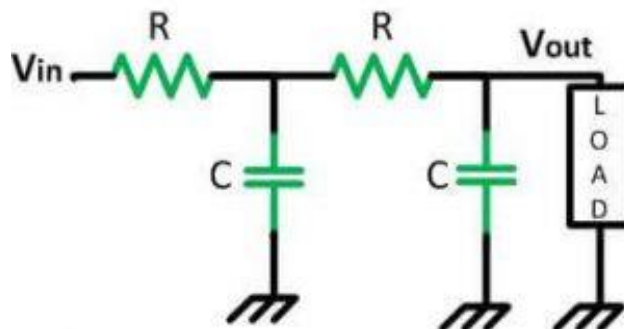
Pada saat frekuensi sinyal input sama dengan frekuensi cut-off (f_c) ($f_{in} = f_c$) maka $\omega = 1/RC$ sehingga penguatan tegangan / Gain (G) menjadi -3 dB atau terjadi pelemahan tegangan sebesar 3 dB .

Pada saat frekuensi sinyal input lebih tinggi dari frekuensi cut-off (f_c) ($f_{in} \gg f_c$) maka besarnya penguatan tegangan (G) = $1/\omega RC$ atau $G = -20\log \omega RC$ Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa Filter Lolos Rendah (Low Pass Filter, LPF) hanya meloloskan sinyal dengan frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi cut-off (f_c) saja.

2.5. Low Pass Filter Orde 2

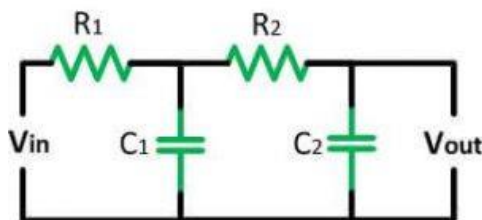
Sampai saat ini kita telah mempelajari tentang low pass filter orde 1, low pass filter dengan satu resistor dan satu kapasitor atau induktor.

Kata “Orde” pada filter pasif mewakili berapa komponen reaktif yang kita gunakan untuk membuat filter pasif. Ketika sebuah rangkaian low pass filter hanya memiliki satu elemen reaktif (kapasitor atau induktor) maka kita menyebutnya low pass filter orde 1. Ketika low pass filter memiliki dua elemen reaktif maka kita menyebutnya low pass filter orde 2.



Gambar 8. LPF RC Orde 2

Kita lihat contoh sederhana di bawah:



Gambar 9. Contoh LPF RC Orde 2

Lalu kita gunakan persamaan penguatan di bawah:

$$A = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^n$$

Dimana:

n= jumlah orde

Frekuensi cutoff untuk low pass filter orde 2 adalah

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}$$

Persamaan frekuensi untuk low pass filter orde 2 adalah

$$f_{(-3dB)} = f_c\sqrt{(2^{(1/n)} - 1)}$$

Dimana:

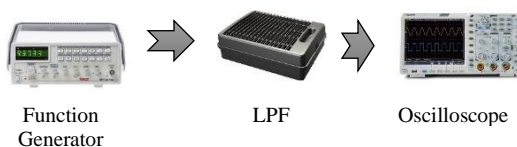
fc= frekuensi cutoff

n= jumlah orde

f(-3dB)= frekuensi band pass

Metode Penelitian

3.1. Metodologi



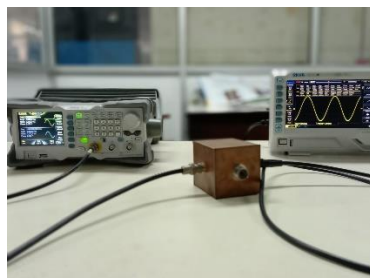
Gambar 10. Blok Diagram Sistem

Setelah rangkain filter yang telah direncanakan telah dirakit, dalam modul ini dipergunakan $f_c = 1,6$ kHz, maka akan diukur karakteristik output dari rangkaian filter tersebut. Input dari rangkaian filter akan dihubungkan dengan Function Generator dengan nilai amplitude konstan dan diubah nilai frekuensinya mulai dari 100 Hz hingga 30 kHz. Output dari rangkaian filter dimonitor dengan osiloskop dan tiap perubahan nilai frekuensi akan dipantau dan dicatat sebagai data pengukuran.

Kemudian langkah diatas diulangi untuk LPF orde 2. Setelah dua tabel pengukuran output didapat, maka di plot di kertas semilog untuk diketahui perbedaan karakteristik output antara filter orde 1 dan orde 2. Dengan membandingkan dua grafik karakteristik output filter, maka bisa diketahui kecuraman masing-masing filter.

Hasil dan Luaran

4.1. Hasil Pengamatan dan Analisa Penelitian



Gambar 11. Pengukuran Karakteristik LPF

Setelah perakitan dan seting instrumentasi yang dipergunakan, maka diinputkan sinyal sinusoida pada terminal input LPF. Saklar pada posisi Orde 1. Sedangkan terminal output LPF dimonitor dengan menggunakan osiloskop. Besar output dari function generator konstan 100 mV(pp). Kemudian ubah nilai frekuensi dari function generator mulai dari 100 Hz hingga 30 kHz. Setiap perubahan frekuensi kita monitor besar level output LPF pada osiloskop.

Bandingkan besar level output dengan level input LPF untuk setiap perubahan frekuensi dengan persamaan :

$$A_v = (V_o/V_i)$$

Dimana : A_v merupakan penguatan tegangan, V_o adalah level output LPF dan V_i adalah level input LPF.

Setelah mendapatkan nilai penguatan tegangan dari masing-masing perubahan frekuensi maka kita ubah nilai A_v dalam bentuk decibel dengan persamaan :

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log(A_v)$$

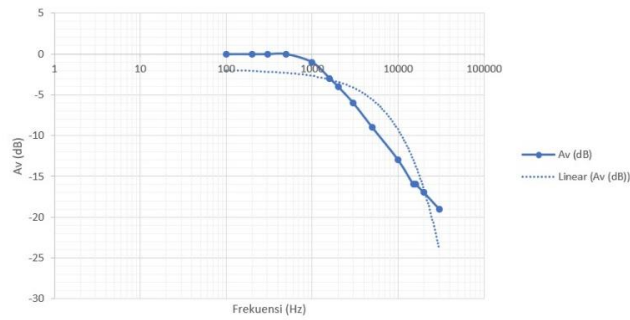
Kemudian plot grafik karakterisknya dengan nilai $A_v(\text{dB})$ sebagai sumbu Y dan nilai frekuensi sebagai sumbu X. Terakhir, kita ulangi langkah pengukuran diatas untuk posisi saklar pada Orde 2.

Vin : 100 mV(p-p)

Freq (Hz)	Orde 1	
	V_o (p-p)	A_v (dB)
100	100	0
200	100	0
300	100	0
500	100	0
1k	88	-1
1,6k	74	-3
2k	65	-4
3k	50	-6
5k	35	-9
10k	21	-13
15k	16	-16

16k	15	-16
20k	14	-17
30k	11	-19

Grafik 1. Pengukuran karakteristik output LPF Orde 1

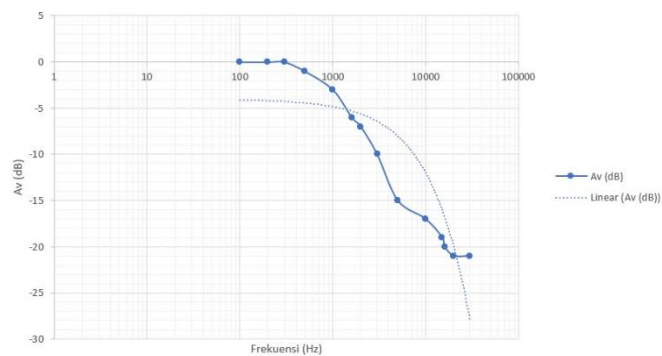


Gambar 12. Grafik karakteristik LPF Orde 1

Vin : 100 mV(p-p)

Freq (Hz)	Orde 2	
	Vo (p-p)	Av (dB)
100	100	0
200	100	0
300	100	0
500	92	-0.7
1k	72	-2.8
1,6k	50	-6
2k	45	-7
3k	32	-10
5k	17	-15
10k	14	-17
15k	11	-19
16k	10	-20
20k	9	-21
30k	9	-21

Grafik 2. Pengukuran karakteristik output LPF Orde 2



Gambar 13. Grafik karakteristik LPF Orde 2

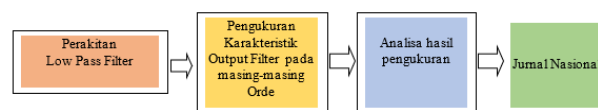
Dengan mengamati perbedaan dari karakteristik output LPF orde 1 dan 2 dapat disimpulkan bahwa semakin besar orde suatu filter maka kecuraman grafiknya juga semakin besar. Dan ini menjadi bukti bahwa dengan bertambahnya orde filter maka akan lebih mendekati karakteristik filter ideal.

4.2. Implementasi Pengamatan

Pengamatan dari spektrum frekuensi pemancar FM ini nantinya bisa digunakan untuk melihat apakah frekuensi kerja pemancar sudah sesuai dan berapa besar daya yang dipancarkan. Dengan mengetahui berapa besar daya pancarnya, yang dalam penelitian ini sangat rendah, pada akhirnya kita bisa merancang suatu antenna penguat pemancar tersebut, yang bertujuan agar sinyal yang dikeluarkan oleh pemancar tadi bisa terpancar maksimal dan bisa dijangkau pada lingkup yang lebih luas. Tentunya dengan memperhatikan lagi, apakah mengganggu pemancar konvensional ataukah tidak.

4.3. Luaran yang Dicapai

Target luaran dari penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 14. Skema Target Luaran Penelitian

Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Dari pengamatan pengujian, kita dapat mengamati bahwa semakin besar orde dari sebuah rangkaian filter, maka semakin curam grafik karakteristik outputnya. Sehingga bisa lebih mendekati grafik filter ideal secara teori. Namun yang perlu dipahami bahwa dengan semakin besar orde dari sebuah filter maka rangkaian filternya pun akan semakin kompleks.

5.2. Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan ini, kedepan semoga bisa dikembangkan dengan menggunakan piranti Arduino untuk membuat sebuah filter, sehingga bisa lebih mendekati filter yang ideal..

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Eko Supriyanto, Arifin, 2019, Buku Petunjuk Praktikum Sistem Komunikasi, Laboratorium Dasar Telekomunikasi PENS.
- [2] Frenzel, 2019. *Principles Of Electronics Communication System*, Mc Graw Hill India.
- [3] Albert D. Helfrick, William D. Cooper, 2015. *Modern Electronic Instrumentation and Measurement*, Pearson, India.
- [4] ARRL Amateur Radio, 2021. *The ARRL Handbook For Radio Communications*.
- [5] Mudrik Alaydrus, "Saluran Transmisi Telekomunikasi", Graha Ilmu, 2018.
- [6] Michael Kolawole, *A Course in Telecommunication Engineering*, S.Chand Publishing, 2017

- [7] Mitchel E Schultz, Grob's Basic Electronics (Engineering Technologies & the Trades) 12th Edition, McGraw-Hill's, 2016