

TUGAS PROYEK PERANCANGAN FILTER DIGITAL



Michael Fransiscus Munthe (13219029)

Dosen : Dr. Yoanes Bandung, S.T., M.T.

Tanggal Pengumpulan : 15 Desember 2021

EL3010 – Pengolahan Sinyal Digital

Laboratorium Dasar Teknik Elektro - Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB

Abstrak

Pada tugas proyek ini, mahasiswa diminta untuk melakukan tiga tipe soal yang berkaitan dengan perancangan filter digital. Ketiga soal itu berkaitan dengan perancangan filter analog lowpass (fir), kemudian perancangan desain band stop filter, dan diakhiri oleh aplikasi modulasi amplitudo digital. Pada perancangan desain fir untuk Low Pass Filter dan pada perancangan desain Band Stop Filter, kedua tugas / soal ini menggunakan instrumen utama pada Microsoft Excel, dimana mahasiswa dituntut untuk merancang setiap langkah dengan tepat mulai dari spesifikasi awal, realisasasi, sampai ke tahap verifikasi dan pengujian. Untuk BSF, diminta BSF digital dalam bentuk kaskade orde dua, yang dalam langkahnya memanfaatkan desain LPF terlebih dahulu kemudian ditransformasikan. Untuk tugas terkait modulasi amplitudo, menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk kode pemrograman dan Audacity sebagai perangkat lunak pendukung untuk membantu penampilan grafik sinyal selama proses modulasi mulai dari pemfilteran, modulasi, demodulasi, sampai ke pemfilteran terakhir. Dengan tugas proyek ini mahasiswa diharapkan lebih memahami dan mampu dalam melakukan pengimplementasian filter digital dan dapat mengembangkan lebih lanjut

Kata kunci: LPF, BSF, Modulasi Amplitudo, pemfilteran, digital, analog, MATLAB, Audacity

1. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Sinyal adalah besaran fisis yang berubah menurut waktu, ruang, atau variable-variabel bebas lainnya. Dimana dengan melakukan pemodelan sinyal, sinyal fisis tersebut dapat dirubah menjadi suatu fungsi matematis dimana sinyal adalah suatu fungsi dari satu atau lebih variabel yang independen. Untuk dapat mengerti lebih lanjut dan menganalisis mengerti sinyal tersebut, maka dilakukan suatu sistem atau pemrosesan sinyal yang secara luas dikenal menjadi dua, yaitu pemrosesan sinyal analog dan pemrosesan sinyal digital. Dimana pada era industri digital, kecepatan dan efisiensi menjadi hal yang utama sehingga pemrosesan sinyal digital menjadi salah satu keahlian yang sangat dibutuhkan pada zaman ini, menimbang pemrosesan sinyal digital memiliki

beberapa keuntungan seperti akurasi yang lebih baik dalam pemrosesan, fleksibilitas yang tinggi, dan transmisi digital yang dapat dipindah dan diproses lebih cepat. Salah satu bagian penting dan fundamental dalam pengolahan sinyal digital adalah proses pemfilteran.

Pada soal atau bagian pertama, mahasiswa diminta untuk merancang suatu filter fir yang berkarakteristik *low pass filter*, dengan menggunakan Microsoft Excel atau sejenisnya sebagai *software* utama. Spesifikasi yang diberikan adalah bekerja pada frekuensi sampling $F_s = 8000$ Hz, dengan atenuasi stopband minimal 50 dB dan frekuensi cut off sebesar 829 Hz. Dimulai dari spesifikasi awal, mahasiswa menghitung koefisien filter yang diminta, kemudian melakukan verifikasi dan pengecekan apakah filter dan nilai yang dirancang sudah sesuai dengan karakteristik *low pass filter*. Diakhir dengan penunjukkan kurva filter *low pass*.

Pada bagian berikutnya, mahasiswa diminta untuk merancang suatu *band stop filter* dengan bentuk kaskade berorde dua. Spesifikasi yang diberikan untuk *passband edge* dan *stopband edge* masing-masing pada $\omega_{p1} = 0.7 \text{ rad}$, $\omega_{s1} = 1.2 \text{ rad}$, $\omega_{s2} = 1.8 \text{ rad}$, dan $\omega_{p2} = 2.2 \text{ rad}$. Untuk *ripple passband* dibatasi dengan $R_p \leq 1 \text{ dB}$ dan peredaman stopband minimal $A_s \geq 30 \text{ dB}$. Masih dengan Microsoft Excel atau *software* sejenisnya, mahasiswa akan mendesain mulai dari spesifikasi awal sampai ke tahap pengecekan dan verifikasi. Karena berbentuk kaskade berorde dua, perancangan BPF memanfaatkan transformasi dari desain LPF terlebih dahulu.

Pada soal terakhir, mahasiswa diminta melakukan modulasi terhadap amplitudo (Radio AM). Dimana rangkaian proses modulasi ini terdiri dari pemfilteran sinyal input dengan menggunakan *low pass filter*, kemudian dilakukan modulasi dengan dua jenis carrier, dilanjutkan proses demodulasi, dan dilakukan pemfilteran terakhir. Kemudian dilakukan analisis terhadap sinyal masukan dan keluar dari setiap tahap tersebut. Proses ini diimplementasikan dengan menggunakan kode program MATLAB dan

Audacity untuk membantu merepresentasikan grafik setiap sinyal yang diinginkan.

1.2 TUJUAN

Dari tugas proyek ini, terdapat beberapa tujuan yang dapat dicapai mahasiswa :

- Memahami dan mampu melakukan teknik implementasi algoritma filter analog FIR *Low-Pass Filter* menggunakan spreadsheet.
- Memahami dan mampu melakukan desain *Band Stop Filter* IIR, khususnya dengan mengimplementasikan sistem *low pass filter* dahulu dan melakukan transformasi agar dapat mencapai BPF berorde dua, serta mengimplementasikan algoritma filter tersebut menggunakan spreadsheet.
- Memahami dan mampu melakukan teknik, serta menganalisis efek dari modulasi amplitudo menggunakan MATLAB.

2. STUDI PUSTAKA

Berikut teori / ilmu yang dijadikan penunjang oleh mahasiswa dalam persiapan dan eksekusi pelaksanaan tugas proyek

2.1 DASAR TEORI PEMFILTERAN

Sinyal di dunia nyata ada dalam bentuk analog dan selalu merupakan sinyal komposit antara bagian yang diketahui dan yang tidak diketahui. Misalnya, suara di jalur telepon adalah gabungan dari suara speaker di ujung dan derau. Pendengar di ujung harus mem-filter suara dominan agar pembicaraan dapat berlangsung. Contoh ini menunjukkan bahwa telepon mem-filter hampir semua derau kanal dan selanjutnya terserah pengguna untuk mem-filter dan mengartikan suara. Karenanya, pem-filter-an adalah teknik pemrosesan sinyal yang mendasar untuk mengekstrak sinyal yang diperlukan dari bentuk aslinya. Semua teknik pem-filter-an analog -low-pass, high-pass, band-pass, dan band-stop-dapat diimplementasikan di domain digital bila sinyalnya di-sampling dengan tepat. Sampel sinyal ini dikirim melalui struktur filter digital untuk melakukan pem-filter-an. Filter digital diklasifikasi menjadi filter FIR (Finite Impulse Response) dan IIR (Infinite Impulse Response). Masing-masing filter ini dapat melakukan hal yang serupa dengan filter analog. Filter analog mengambil input analog dan menghasilkan output analog. Filter digital, dengan adanya perangkat pencuplikan dan konverter, melakukan

hal yang sama dengan filter analog. Pada kasus pem-filter-an digital, fungsi transfernya akan berupa model filter FIR ataupun IIR. Sinyal keluarannya dapat ditulis sebagai persamaan perbedaan agar model filter dapat diimplementasikan ke hardware digital.

Keuntungan filter FIR :

- Selalu stabil (karena fungsi transfer tidak memiliki pole)
- Dapat dirancang untuk memiliki fasa linier
- Lebih mudah untuk diimplementasikan ke hardware
- Respon transien memiliki durasi yang terbatas

Tetapi filter ini juga memiliki beberapa kelemahan yaitu membutuhkan banyak orde untuk memperoleh respons filter yang semakin baik sehingga otomatis delay-nya pun lebih lama.

2.2 STRUKTUR FIR DENGAN LCCDE

Sebuah FIR memiliki respons impulse $h[n]$ berdurasi terbatas. Asumsi filter causal, maka untuk sebuah FIR terdapat sebuah M sehingga

$$h[n] = 0; n < 0 \cup n \geq M$$

Sebuah LCCDE bersifat FIR memiliki bentuk

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k]$$

yang memiliki respon impuls

$$h[n] = \begin{cases} b_n; & 0 \leq n \leq M \\ 0; & \text{else} \end{cases}$$

Persamaan 2.1.1

Filter ini memiliki fungsi system

$$H(z) = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} = \sum_{n=0}^M h[n] z^{-n}$$

sehingga memiliki spektrum

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^M b_k e^{-j\omega k}$$

Persamaan 2.1.2

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^M b_k \cos \omega k - j \sum_{k=0}^M b_k \sin \omega k$$

$$|H(\omega)| = \sqrt{\left(\sum_{k=0}^M b_k \cos \omega k\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^M b_k \sin \omega k\right)^2}$$

$$|H(\omega)|^2 = \left(\sum_{k=0}^M b_k \cos \omega k\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^M b_k \sin \omega k\right)^2$$

Persamaan 2.1.3

Dengan kata lain, apabila kita memiliki filter FIR LCCDE dengan koefisien b_k memenuhi Pers (2.1.1), maka filter ini akan memiliki sifat spektrum menurut Pers (2.1.2).

Tabel 2-1 Jenis Windows

Nama	Persamaan $w[n]$ ($0 \leq n \leq M$)
Rektangular	1
Barlett	$\begin{cases} 2n/M; & 0 \leq n \leq M/2 \\ 2 - 2n/M; & M/2 < n \leq M/2 \end{cases}$
Hanning	$0.5 [1 - \cos(2\pi n/M)]$
Hamming	$0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/M)$
Blackman	$0.42 - 0.5 \cos(2\pi n/M) + 0.08 \cos(4\pi n/M)$

Sebuah filter ideal memiliki sifat magnituda spektrum

$$|\bar{H}(\omega)| = \begin{cases} 1; & \text{daerah passband} \\ 0; & \text{daerah stopband} \end{cases}$$

Filter ini memiliki respons impuls $\bar{h}[n]$ yang adalah inverse Fourier Transform dari $\bar{H}(\omega)$. Sebagai contoh sebuah LPF ideal pada frekuensi cutoff ω_c memiliki sifat magnituda spektrum

$$|\bar{H}(\omega)| = \begin{cases} 1; & 0 \leq |\omega| \leq \omega_c \\ 0; & \text{else} \end{cases}$$

Pada umumnya filter ini memiliki spektrum

$$\bar{H}(\omega) = \begin{cases} 1 \cdot e^{-j\alpha\omega}; & 0 \leq |\omega| \leq \omega_c \\ 0; & \text{else} \end{cases}$$

Maka respons impulsnya adalah

$$\bar{h}[n] = \frac{\sin(\omega_c(n - \alpha))}{\pi(n - \alpha)}$$

Persamaan 2.1.4

Kita ingin membuat sebuah LCCDE memiliki spektrum ideal ini dengan koefisien b_k

menggunakan $\bar{h}[n]$ ini, menurut Pers (621.1). Tapi tidak bisa, karena dua masalah : $\bar{h}[n]$ tidak otomatis causal, dan tidak berdurasi terbatas (atau bersifat IIR bukan FIR).

Maka kita menggunakan fungsi windows $w[n]$ untuk membatasi durasi $\bar{h}[n]$, kemudian menggeser hasilnya agar bersifat causal. Pergeseran di domain waktu ke kanan sejauh α akan sama dengan mengalikan spektrum dengan eksponensial kompleks $e^{-j\alpha\omega}$

2.3 WINDOWS

Fungsi windows adalah fungsi yang bernilai nol di luar range $0 \leq n \leq M$. Ada beberapa windows yang bisa digunakan, seperti diperlihatkan pada Tabel berikut

Tabel 2-2 Jenis Windows dan Spesifikasinya

Nama	Transisi Maksimal	Transisi Rata-Rata	Atenuasi Stopband Minimum
Rektangular	$4\pi/(M+1)$	$1.8\pi/(M+1)$	21 dB
Barlett	$8\pi/(M+1)$	$6.1\pi/(M+1)$	25 dB
Hanning	$8\pi/(M+1)$	$6.2\pi/(M+1)$	44 dB
Hamming	$8\pi/(M+1)$	$6.6\pi/(M+1)$	53 dB
Blackman	$12\pi/(M+1)$	$11\pi/(M+1)$	74 dB

Misalnya kita memilih windows rektangular

$$w[n] = \begin{cases} 1; & 0 \leq n \leq M \\ 0; & \text{else} \end{cases}$$

sehingga

$$h[n] = \bar{h}[n] \cdot w[n]$$

Sekarang $h[n]$ sudah berdurasi terbatas (FIR) hasil perkalian dengan $w[n]$. Pemotongan $\bar{h}[n]$ oleh $w[n]$ membuat energi $h[n]$ lebih kecil dari energi $\bar{h}[n]$. Kita memilih α yang optimal agar energi $h[n]$ semaksimal mungkin. Karena pada $\alpha = 0$ $\bar{h}[n]$ simetri pada $n = 0$, maka kita memilih titik tengah dari $w[n]$, atau

$$\alpha = \frac{M}{2}$$

Dengan demikian kita sekarang bisa menggunakan

$$b_k = h[k] = \bar{h}[k] \cdot w[k]$$

untuk $k = 0, 1, \dots, M$.

Dengan cara ini kita bisa membuat FIR-LCCDE.

Tapi spektrumnya bukan lagi $\bar{H}(\omega)$ tetapi $H(\omega)$ menurut hubungan konvolusi dengan spektrum dari $w[n]$, yakni

$$H(\omega) = H(\omega) \otimes W(\omega)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W(\lambda) \bar{H}(\omega - \lambda) d\lambda$$

$$|H(\omega)| \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |W(\lambda)| |\bar{H}(\omega - \lambda)| d\lambda$$

di mana spektrum dari $w[n]$ untuk windows rektangular adalah

$$W(\omega) = \frac{\sin \frac{\omega(M+1)}{2}}{\sin \frac{\omega}{2}} e^{-j\omega \frac{M}{2}}$$

Spektrum windows ini memiliki daerah transisi antara passband dan stopband tidak melebihi $4\pi/(M+1)$ dengan atenuasi minimal di bagian stopband 21 dB, sebagaimana diperlihatkan Tabel 6.2. Perhatikan bahwa lebar daerah transisi ditentukan oleh M . Semakin besar M , semakin sempit daerah transisi. Namun atenuasi stopband minimal tidak ditentukan oleh M , tapi ditentukan oleh jenis windows. Meskipun windows Blackman memiliki atenuasi terbaik, tetapi untuk M yang sama, windows ini memiliki rentang transisi yang paling lebar.

2.4 DESAIN FILTER FIR

Dengan demikian proses desain adalah sebagai berikut:

- Definisikan spesifikasi filter $H(z)$, terutama spektrum magnitudanya.
- Berdasarkan atenuasi minimal, tentukan windows yang hendak dipakai
- Berdasarkan posisi pass-band dan stopband, tentukan lebar daerah transisi serta titik cutoff
- Berdasarkan lebar transisi dan windows yang dipilih, tentukan M
- Berdasarkan titik cut-off dan M , tentukan profile spektrum filter ideal $\bar{H}(\omega)$
- Berdasarkan M (terutama untuk menghitung durasi delay α), cari respons impuls ideal $h[n]$ dengan melakukan inverse transform $\bar{H}(\omega)$
- Tentukan koefisien b_k dengan mengalikan windows pada respons impuls ideal $h[n]$

- Verifikasi magnitude spektrum dari filter LCCDE FIR

2.5 APLIKASI PADA DESAIN FILTER DIGITAL IIR LCCDE

Proses mendesain filter IIR dimulai dengan dengan spesifikasi filter $|H(\omega)|$ yang diinginkan, baik LPF, HPF, BPF, maupun BSF. Hasilnya adalah $H(z)$ yang spektrumnya memenuhi spesifikasi tersebut. Dalam praktek kita akan menggunakan LCCDE sebagai filter. Secara spesifik kita akan menggunakan kaskade filter orde satu dan orde dua untuk merealisasikan filter ini. Filter digital LCCDE ini datang dari filter LCCDE analog, melalui transformasi bilinear.

Filter analog LCCDE ini adalah hasil transformasi frekuensi dari filter prototip LPF Butterworth. Oleh sebab itu spesifikasi awal harus ditranslasikan menjadi spesifikasi filter analog dan kemudian spesifikasi LPF prototip, sedemikian sehingga hasil implementasi dan transformasi akan menghasilkan $H(z)$ yang diinginkan.

Variasi dari proses desain ini adalah dengan membuat spesifikasi dari filter analog, dengan asumsi filter analog ini akan diimplementasi dengan filter digital. Dengan demikian urutan prosesnya adalah:

- Spesifikasi Filter Digital
- Spesifikasi Filter Analog Untuk Transformasi Bilinear
- Spesifikasi LP Prototip untuk Transformasi Frekuensi
- Desain dan Realisasi Filter LP Prototip Dengan Sistem Butterworth (Dalam Cascade orde Satu atau Dua)
- Realisasi Filter Analog melalui Transformasi frekuensi
- Realisasi Filter Digital melalui Transformasi Bilinear Filter Analog
- Verifikasi Filter Digital

2.6 TEKNIK PADA DESAIN FILTER DIGITAL IIR LCCDE

Teknik-teknik yang dimaksud didasarkan pada mengkonversikan filter analog menjadi filter digital. Filter analog dapat dideskripsikan sebagai fungsi sistemnya

$$H_a(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{\sum_{k=0}^M \beta_k s^k}{\sum_{k=0}^N \alpha_k s^k}$$

Dengan $\{\alpha_k\}$ dan $\{\beta_k\}$ adalah koefisien filternya, berhubungan dengan $H_a(s)$ dengan transformasi Laplace,

$$H_a(s) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-st} dt$$

Atau dalam linear constant-coefficient differential equation (LCCDE),

$$\sum_{k=0}^N \alpha_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = \sum_{k=0}^M \beta_k \frac{d^k x(t)}{dt^k}$$

Berikutnya adalah cara desain filter IIR menggunakan transformasi Bilinear. Transformasi Bilinear menggunakan konsep mapping dari s-plane ke z-plane sehingga dapat mendesain filter dengan konfigurasi apapun (tidak terbatas di lowpass dan bandpass). Persamaan transformasi bilinear dinyatakan sebagai berikut

$$s = \frac{2}{T} \left(\frac{re^{j\omega} - 1}{re^{j\omega} + 1} \right)$$

$$s = \frac{2}{T} \left(\frac{r^2 - 1}{1 + r^2 + 2r \cos \omega} + j \frac{2r \sin \omega}{1 + r^2 + 2r \cos \omega} \right)$$

$$\sigma = \frac{2}{T} \frac{r^2 - 1}{1 + r^2 + 2r \cos \omega}$$

$$\Omega = \frac{2}{T} \frac{2r \sin \omega}{1 + r^2 + 2r \cos \omega}$$

Perhatikan bahwa jika $r < 1$ maka $\sigma < 0$ dan jika $r > 1$ maka $\sigma > 0$, lalu

$$\Omega = \frac{2}{T} \frac{\sin \omega}{1 + \cos \omega} = \frac{2}{T} \tan \frac{\omega}{2}$$

$$\omega = 2 \arctan \left(\frac{\Omega T}{2} \right)$$

2.7 MODULASI AMPLITUDO

Modulasi Amplitudo (Amplitude Modulation, AM) adalah proses menumpangkan sinyal informasi ke sinyal pembawa (carrier) dengan sedemikian rupa sehingga amplitudo gelombang pembawa berubah sesuai dengan perubahan simpangan (tegangan) sinyal informasi. Pada jenis modulasi ini amplitudo sinyal pembawa diubah secara proporsional terhadap amplituda sesaat sinyal pemodulasi, sedangkan frekuensinya tetap selama proses modulasi.

Untuk sinyal modulasi dan sinyal carrier dinyatakan sebagai berikut

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$$

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

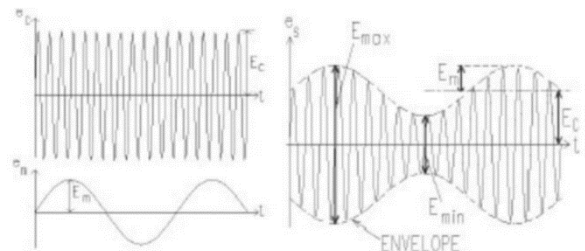
Dimana A_m dan A_c adalah amplituda sinyal modulasi dan carrier, serta f_m dan f_c adalah frekuensi sinyal modulasi dan carrier.

Untuk persamaan gelombang termodulasi dinyatakan sebagai berikut

$$s(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

Dengan $\mu = A_m/A_c$ adalah indeks modulasi

Representasi dari Amplitude Modulation ditunjukkan oleh gambar berikut



Gambar 2-1 Representasi Sinyal pada Modulasi Amplitudo

2.8 MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik. Pada awalnya, program ini merupakan interface untuk koleksi rutin-rutin numerik dari proyek LINPACK dan EISPACK, namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. MATLAB telah berkembang menjadi sebuah environmen pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi built-in untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier, dan kalkulasi matematis lainnya. MATLAB juga berisi toolbox yang berisi fungsi-fungsi tambahan untuk aplikasi khusus.

MATLAB bersifat extensible, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk ditambahkan pada library ketika fungsi-fungsi built-in yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu. Kemampuan pemrograman yang dibutuhkan tidak terlalu sulit bila Anda telah memiliki pengalaman dalam pemrograman bahasa lain seperti C, PASCAL, atau FORTRAN

3. METODOLOGI

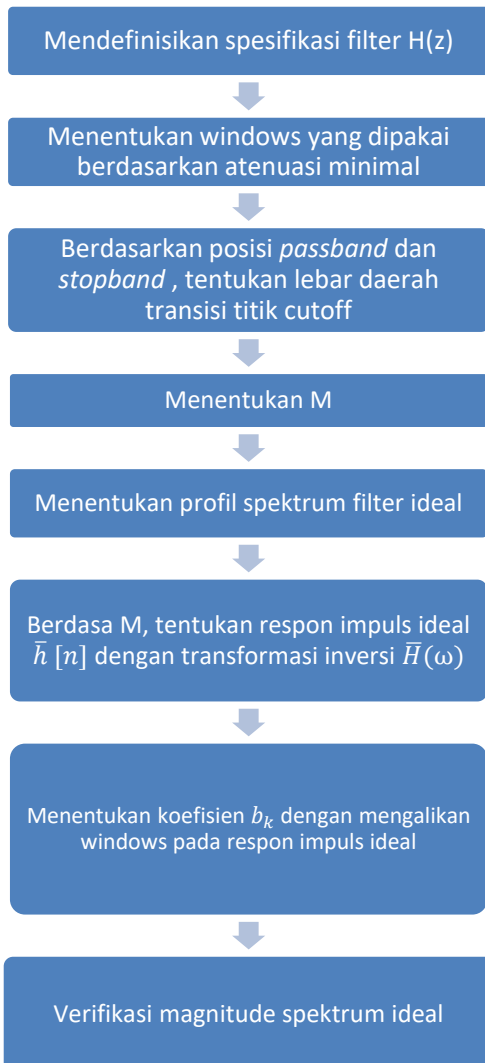
3.1 PERALATAN

- Computer
- Software Spreadsheet
- Software MATLAB
- Software Audacity

3.2 LANGKAH-LANGKAH

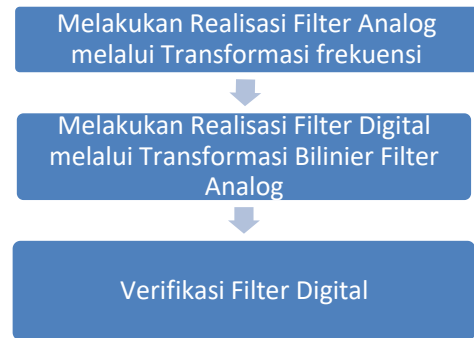
Berikut bagaimana setiap tugas / soal dilakukan pada tugas proyek kali ini

a. Soal 1 : Desain FIR LPF



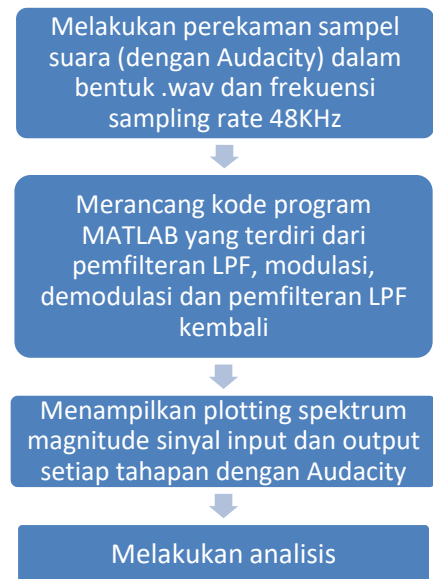
Gambar 3-2 Diagram Langkah Pengerjaan Soal 1

b. Soal 2 : Desain BSF



Gambar 3-3 Diagram Langkah Pengerjaan Soal 2

c. Soal 3 : Modulasi Amplitudo



Gambar 3-3 Diagram Langkah Pengerjaan Soal 3

4. HASIL DAN ANALISIS

Seluruh source code lengkap dan tabel pendukung untuk setiap soal tercantum pada lampiran di bagian akhir laporan dan juga file eksternal

4.1 SOAL 1 : DESAIN FILTER FIR LPF

Pada soal pertama ini, diawali dengan menentukan spesifikasi untuk filter low pass analog. Telah diberikan spesifikasi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, mahasiswa hanya menentukan besaran frekuensi pass dan frekuensi stop yang sekiranya sesuai. Berikut spesifikasi yang ditentukan

Tabel 4-1-1 Spesifikasi LPF Analog

Spesifikasi LPF Analog	Nilai
$A_s \leq$	-50
$F_{cut\ off}$	829
F_{pass}	420
F_{stop}	1238
F_s	8000

Untuk penentuan frekuensi pass dan stop sendiri, ditentukan dengan berdasar rumus berikut :

$$fc = (fs + fp) / 2$$

Dimana dimulai dengan menerka / menentukan frekuensi pass terlebih dahulu yang dirasa masuk akal

Langkah berikutnya adalah menghitung spesifikasi filter LPF digital yang ideal hasil sampling, berikut hasilnya :

Tabel 4-1-2 Spesifikasi LPF Digital Ideal Hasil Sampling

Filter LPF Ideal Digital Hasil Sampling	
ω_p	0.329867229
ω_s	0.972322926
Transisi	0.642455698
ω_c	0.651095077

Karena spesifikasi atenuasi yaitu $A_s \leq 50$ dB, windows yang dapat dipilih yaitu Hamming. Pilihannya antara Hamming dan Blackman, namun Hamming dipilih karena diperoleh M sekecil mungkin sesuai tabel yang ada pada studi Pustaka sebelumnya. Dengan rumusan M dan α yang telah dijelaskan sebelumnya, didapat spesifikasi window sebagai berikut

Tabel 4-1-3 Spesifikasi Windows

Windows	Hamming
M	39
alpha	19.5

Didapat M = 39, maka akan terdapat 39 koefisien filter low pass yang didapat dari hasil perkalian respon impuls $h[n]$ dan $w[n]$. Berikut hasil perkalian kedua komponen yang menjadi koefisien filter lowpass

Tabel 4-1-4 Koefisien Filter

n	h(n)	w(n)	bn
0	0.002116	0.08	0.000169
1	-0.00857	0.085957	-0.00074
2	-0.01676	0.103673	-0.00174
3	-0.01868	0.13269	-0.00248
4	-0.01271	0.172256	-0.00219
5	-0.00035	0.221347	-7.8E-05
6	0.013986	0.27869	0.003898
7	0.02444	0.342801	0.008378
8	0.025842	0.41202	0.010647
9	0.015931	0.484553	0.007719
10	-0.00327	0.558522	-0.00183
11	-0.0255	0.632012	-0.01611
12	-0.04182	0.703118	-0.02941

13	-0.04343	0.77	-0.03344
14	-0.02462	0.830925	-0.02046
15	0.014861	0.884315	0.013142
16	0.069086	0.928787	0.064166
17	0.127118	0.963191	0.122438
18	0.175839	0.986633	0.173489
19	0.203609	0.998508	0.203305
20	0.203609	0.998508	0.203305
21	0.175839	0.986633	0.173489
22	0.127118	0.963191	0.122438
23	0.069086	0.928787	0.064166
24	0.014861	0.884315	0.013142
25	-0.02462	0.830925	-0.02046
26	-0.04343	0.77	-0.03344
27	-0.04182	0.703118	-0.02941
28	-0.0255	0.632012	-0.01611
29	-0.00327	0.558522	-0.00183
30	0.015931	0.484553	0.007719
31	0.025842	0.41202	0.010647
32	0.02444	0.342801	0.008378
33	0.013986	0.27869	0.003898
34	-0.00035	0.221347	-7.8E-05
35	-0.01271	0.172256	-0.00219
36	-0.01868	0.13269	-0.00248
37	-0.01676	0.103673	-0.00174

Kemudian dilakukan verifikasi penguatan filter di frekuensi passband edge dan stopband edge berikut

Tabel 4-1-5 Verifikasi pada Titik Spesifikasi

Verifikasi Spektrum Pada Titik Spesifikasi			
	ω	$ H(\omega) ^2$	$10\log(H(\omega) ^2)$
Passband edge	0.329867	1.003466	0.0150253
Stopband edge	0.972323	4.64E-06	-53.3352367

Didapat nilai passband edge 0.01 dB, dan stopband edge -53,3 dB, ini berarti proses perancangan filter FIR LPF sesuai karakteristik LPF pada umumnya, dan berdasar spesifikasi atenuasi dan ripple.

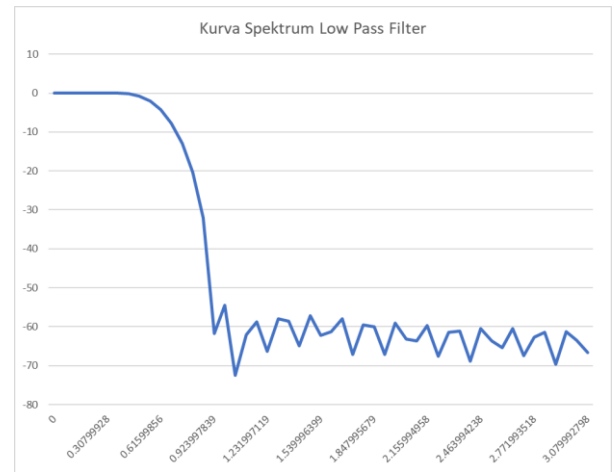
Kemudian dilakukan pengujian terhadap banyak nilai spektrum di banyak titik frekuensi, dalam hal ini dilakukan pengujian terhadap 51 sampel yang dapat dilihat dibawah ini

Tabel 4-1-6 Nilai Spektrum Magnitude di Banyak Titik Frekuensi

Penguatan Filter Pada Banyak Titik Frekuensi			
k	ω	$ H(\omega) ^2$	$10\log(H(\omega) ^2)$
0	0	0.996674	-0.014467256
1	0.0616	0.998784	-0.005282355

2	0.1232	1.002072	0.008991296
3	0.1848	1.002204	0.009561866
4	0.246399	1.000859	0.00373028
5	0.307999	1.002726	0.01182323
6	0.369599	1.000313	0.00136052
7	0.431199	0.961665	-0.169762524
8	0.492799	0.843095	-0.741233694
9	0.554399	0.631906	-1.993474264
10	0.615999	0.379154	-4.211841751
11	0.677598	0.169724	-7.702559993
12	0.739198	0.051664	-12.86815607
13	0.800798	0.009108	-20.40569574
14	0.862398	0.00062	-32.07338132
15	0.923998	6.66E-07	-61.76629611
16	0.985598	3.51E-06	-54.54233861
17	1.047198	5.55E-08	-72.55527116
18	1.108797	6.12E-07	-62.1349965
19	1.170397	1.32E-06	-58.80414547
20	1.231997	2.33E-07	-66.32379815
21	1.293597	1.62E-06	-57.90956273
22	1.355197	1.36E-06	-58.66066538
23	1.416797	3.24E-07	-64.8921517
24	1.478397	1.93E-06	-57.13988195
25	1.539996	6.1E-07	-62.14460224
26	1.601596	7.44E-07	-61.28511324
27	1.663196	1.58E-06	-57.99987432
28	1.724796	1.93E-07	-67.13393489
29	1.786396	1.12E-06	-59.52116708
30	1.847996	9.97E-07	-60.01222591
31	1.909596	1.94E-07	-67.11194693
32	1.971195	1.24E-06	-59.07941549
33	2.032795	4.74E-07	-63.24277917
34	2.094395	4.36E-07	-63.60419615
35	2.155995	1.09E-06	-59.62662625
36	2.217595	1.74E-07	-67.60191925
37	2.279195	7.17E-07	-61.44736609
38	2.340795	7.75E-07	-61.10832839
39	2.402394	1.31E-07	-68.83313901
40	2.463994	8.87E-07	-60.5220043
41	2.525594	4.3E-07	-63.66855763
42	2.587194	2.87E-07	-65.42018996
43	2.648794	8.78E-07	-60.56328309
44	2.710394	1.81E-07	-67.41610714
45	2.771994	5.31E-07	-62.75245814
46	2.833593	7.06E-07	-61.51230446
47	2.895193	1.07E-07	-69.71626102
48	2.956793	7.39E-07	-61.31295805
49	3.018393	4.48E-07	-63.48514982
50	3.079993	2.15E-07	-66.67995862

Dari tabel di atas, dapat dibentuk kurva karakteristik filter low pass



Gambar 4-1-1 Kurva Spektrum LPF

Tidak selesai pada tahap ini, rancangan filter LPF ini diuji kembali dengan melakukan verifikasi dengan

$$x[n]=\cos(\omega_c n)$$

Dimana ω_c merupakan titik frekuensi cut-off yang telah dinormalisasi dari spesifikasi. Hubungan dari $y[n]$ dengan $x[n]$ yaitu sebagai berikut.

$$y[n]=H[n]*x[n]$$

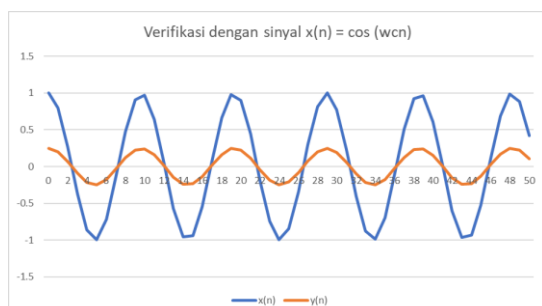
Berikut adalah hasil pengujian yang dilakukan sebanyak 51 sampel

Tabel 4-1-7 Verifikasi dengan Sinal $x[n]$

Verifikasi dengan sinyal $x(n) = \cos(wcn)$		
wc	0.651095077	
$ H(wc) ^2$	0.249888413	
n	x(n)	y(n)
0	1	0.249888413
1	0.795420595	0.19876639
2	0.265387847	0.066317348
3	-0.373230677	-0.09326602
4	-0.859138581	-0.21468878
5	-0.993522367	-0.24826973
6	-0.721397724	-0.18026893
7	-0.154106847	-0.03850952
8	0.476238204	0.119006409
9	0.911726198	0.227829813
10	0.974173387	0.243434642
11	0.638028953	0.159436042
12	0.040829352	0.010202782
13	-0.573075938	-0.14320504
14	-0.952502159	-0.23801925
15	-0.942203731	-0.2354458
16	-0.546394347	-0.13653762
17	0.072977098	0.018236131

18	0.662489321	0.165548405
19	0.980938201	0.24512509
20	0.898027576	0.224406686
21	0.447681056	0.111870309
22	-0.185838111	-0.04643879
23	-0.743319978	-0.18574705
24	-0.996665928	-0.24905527
25	-0.842217234	-0.21046033
26	-0.343167939	-0.08575369
27	0.296291541	0.074039823
28	0.814520727	0.203539292
29	0.999481582	0.249758866
30	0.775495743	0.193787401
31	0.234208989	0.058526113
32	-0.402906436	-0.10068165
33	-0.875169143	-0.21869463
34	-0.989348686	-0.24722677
35	-0.698727499	-0.17460391
36	-0.1222158	-0.03054031
37	0.50430157	0.126019119
38	0.92447951	0.231016718
39	0.966398515	0.241491791
40	0.612907054	0.153158371
41	0.008639272	0.002158854
42	-0.599163343	-0.14972398
43	-0.961812999	-0.24034592
44	-0.930928393	-0.23262822
45	-0.519146234	-0.12972863
46	0.105049179	0.026250573
47	0.686262796	0.171489121
48	0.986685944	0.246561385
49	0.883397846	0.220750886
50	0.418659738	0.104618217

Dari tabel di atas dilakukan plot sinyal hubungan sinyal $x[n]$ dan $y[n]$:



Gambar 4-1-2 Kurva Hubungan $x[n]$ dan $y[n]$

Pada gambar di atas, terlihat plot $y[n]$ dan $x[n]$ dimana $x[n]$ merupakan sinyal sinusoidal dengan nilai frekuensi sebesar frekuensi cut-off dan $y[n]$ merupakan output dari filter. Pada gambar terlihat juga bahwa saat input bernilai 1, amplitud output mendekati nilai 0.5 Hal ini

menunjukkan bahwa penguatan yang diperoleh ketika frekuensi sinyal input yang digunakan adalah ω_c sebesar 0.5.

Dari semua data yang dihasilkan dalam setiap proses, dapat dikatakan rancangan filter FIR LPF telah sesuai spesifikasi dan berhasil

4.2 SOAL 2 : DESAIN FILTER IIR BSF

Dengan segala spesifikasi yang diberikan, langkah yang mirip untuk mengawali seperti pada soal sebelumnya adalah menyatakan / mencatat seluruh spesifikasi BSF Digital ini. Berikut dapat dilihat seluruh spesifikasi mulai dari spesifikasi digital, analog, dan spesifikasi untuk transformasi bilinear

Tabel 4-2-1 Spesifikasi Awal Perancangan BSF

SPESIFIKASI				
Spesifikasi BSF Digital		Spesifikasi BSF Analog		
Sistem kaskade orde dua $H_1(z)$		Sistem kaskade orde dua $H_1(s)$		
ω_{p1} (rad)	0.7	Ω_{p1}	0.365028495	
ω_{s1} (rad)	1.2	Ω_{s1}	0.684136808	
ω_{s2} (rad)	1.8	Ω_{s2}	1.260158218	
ω_{p2} (rad)	2.2	Ω_{p2}	1.964759657	
$R_p \geq$ (dB)	-1	$R_p \geq$ (dB)	-1	
$A_s \leq$ (dB)	-30	$A_s \leq$ (dB)	-30	
Spesifikasi Filter LP Prototip Analog Untuk Transformasi Frekuensi	Ω_0^2	0.71719326		
	B	1.59973116		
	C2	0.43196551		
	C1	0.2276518		
	C	0.43196551		
	$R_p \geq$ (dB)	-1		
	$A_s \leq$ (dB)	-30		

Kemudian selanjutnya akan dicari nilai Ω_p , Ω_s , dan cut-off -3 dB Ω_c . Karena filter yang dirancang mengalami transformasi frekuensi, sehingga tidak perlu untuk mengetahui posisi absolut dari Ω_p dan Ω_s sehingga Ω_c dapat dipilih arbitrari. Sehingga dipilih $\Omega_c=1$

Tabel 4-2-2 Desain Filter LP Analog Butterworth

DESAIN FILTER LP ANALOG BUTTERWORTH		
C_p	0.258925412	
C_s	999	
N	4.918916	5
Ω_c	1	
Ω_p	0.87360974	
Ω_s	1.995062699	
$R_p \geq$ (dB)	-1	
$A_s \leq$ (dB)	-30	

Kemudian akan direalisasikan filter lowpass analog dalam cascade orde dua dengan parameter jenis filter butterworth. Didapatkan pole stage orde satu butterworth sebagai berikut.

Tabel 4-2-3 Pole Stage Orde Satu Butterworth beserta filternya

POLES DENGAN PARAMETER BUTTERWORTH	Pole	Sudut pole	Re{p _k }	Im{p _k }
	1	1.88495559	-0.309016994	0.951056516
	2	2.51327412	-0.809016994	0.587785252
	3	3.14159265	-1	1.22515E-16
	4	3.76991118	-0.809016994	-0.587785252
	5	4.39822972	-0.309016994	-0.951056516
FILTER BUTTERWORTH YANG DIDAPAT				
Stage	Re {pole 1}	Im {pole 1}	Re {konj. pole 1}	Im {konj. pole 1}
1	-0.309017	0.95105652	-0.309016994	-0.951056516
2	-0.809017	0.58778525	-0.809016994	-0.587785252
3	-1	1.2251E-16		

Kemudian dilakukan tahapan tranformasi dari LP Analof Orde satu ke BS analog orde dua dengan pendetailan seperti dibawah ini

Tabel 4-2-4 tranformasi dari LP Analof Orde satu ke BS analog orde dua

TRANSFORMASI FREKUENSI DARI LP ANALOG ORDE SATU KE BS ANALOG ORDE DUA						
Parameter Poles						
Stage	a1	arg(a1)	Re(D)	Im(D)	D	arg(D)
1	1.3975407	1.25663706	-4.448880378	1.148015178	4.594613745	2.889055866
2	1.3975407	0.62831853	-2.265225745	1.857527578	2.929446429	2.454763794
3	1.3975407	0	-0.915652962	4.78572E-16	0.915652962	3.141592654
Parameter C dan D						
Stage	Re(c)	Im(c)	Re(d)	Im(d)		
1	-0.215932	-0.6645701	0.134969148	1.063219999		
2	-0.565317	-0.4107269	0.288145077	0.805812647		
3	-0.69877	-8.561E-17	1.35546E-16	0.478448786		
Poles dari BSF						
Stage	Re(p _i)	Im(p _i)				
1	-0.080963	0.39864989				
2	-0.350901	-1.7277901				
3	-0.277172	0.39508573				
4	-0.853462	-1.2165396				
5	-0.69877	0.47844879				
Koefisien Filter Kaskade Orde Dua BSF Analog						
Stage	b ₂	b ₁	a ₂	a ₁	a ₀	
1	1	0	0.71719326	1	0.161925539	0.165476706
2	1	0	0.71719326	1	0.70180213	3.108390206
3	1	0	0.71719326	1	0.554344043	0.232917066
4	1	0	0.71719326	1	1.706924352	2.208366188
5	1	0	0.71719326	1	1.397540725	0.71719326

Setelah didapat BS analog, kemudian langkah selanjutnya merubahnya ke BS digital, yang tidak begitu sulit karena sudah sama sama orde dua. Berikut hasilnya

Tabel 4-2-5 Tranformasi dari BS Analog ke BS Digital Orde Dua

TRANSFORMASI BILINIER BS ANALOG ORDE DUA KE BS DIGITAL ORDE DUA						
Filter Kaskade Orde Dua						
Stage	b ₂	b ₁	b ₀	a ₂	a ₁	a ₀
1	1.2936495	-0.4261056	1.293649508	0.756026421	-1.257378157	1
2	0.3569906	-0.1175865	0.356990561	0.70820205	0.87663447	1
3	0.960796	-0.3164694	0.960795964	0.379672013	-0.858389332	1
4	0.3493574	-0.1150722	0.349357428	0.305463497	0.491676404	1
5	0.551313	-0.1815929	0.551312975	0.10262595	-0.181592869	1

Selanjutnya dilakukan verifikasi penguatan filter di titik-titik tertentu yaitu batas passband dan batas stopband

Tabel 4-2-6 Verifikasi Titik Istimewa Tertentu

VERIFIKASI BS FILTER DIGITAL									
	k	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4	
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
a ₀	0	1	1	1	1	1	1	1	1
a ₁	1	-1.2573782	0.87663447	-0.858389332	0.491676404	-0.181592869			
a ₂	2	0.75602642	0.70820205	0.379672013	0.305463497	0.10262595			
b ₀	0	1.29364951	0.356990561	0.960795964	0.349357428	0.551312975			
b ₁	1	-0.4261056	-0.117586458	-0.316469416	-0.115072237	-0.181592869			
b ₂	2	1.29364951	0.356990561	0.960795964	0.349357428	0.551312975			
ω		H ₁ (ω)	H ₂ (ω)	H ₃ (ω)	H ₄ (ω)	H ₅ (ω)	H ₆ (ω)	H ₇ (ω)	dB
ω _{0.1}	0.7	8.6736901	0.19555174	2.588799107	0.26951697	0.753095327	0.891250938	-1	
ω _{1.1}	1.2	0.7732567	0.09284015	0.558356487	0.118880216	0.252166349	0.001201622	-58.4046	
ω _{1.2}	1.8	0.6059537	0.4950859	0.571190818	0.388983758	0.443236676	0.029543938	-30.5906	
ω _{2.2}	2.2	0.8475416	2.00126486	0.828980905	0.840743389	0.753095327	0.891250938	-1	

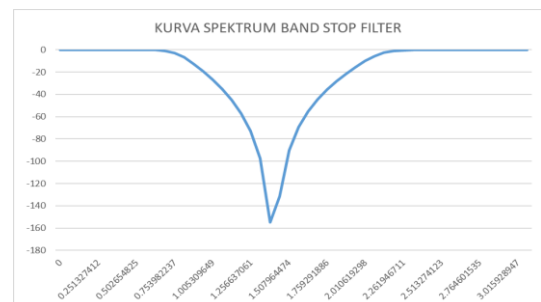
Dari hasil pada tabel di atas, didapatkan Ripple Passband kurang dari atau sama dengan 1, sementara atenuasi Stopband lebih dari 30. Kedua hasil sudah memenuhi spesifikasi filter. Ddengan demikian, dapat disimpulkan bahwa filter sudah berhasil didesain sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan.

Berikut adalah beberapa titik frekuensi yang digunakan untuk melakukan verifikasi filter yang telah dirancang untuk 50 sampel pengujian

Tabel 4-2-7 Nilai Spektrum Magnitude BSF di berbagai frekuensi

Verifikasi Band Stop Filter Digital								
Sampel	ω	H ₁ (ω)	H ₂ (ω)	H ₃ (ω)	H ₄ (ω)	H ₅ (ω)	H ₆ (ω)	dB
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.062832	4.35204	0.230478	3.079358	0.324364	0.998125	1	-3.25364E-12
2	0.125664	4.407054	0.229724	3.0796	0.323166	0.992487	1	-3.52063E-09
3	0.188496	4.502943	0.228458	3.078986	0.321156	0.983046	1	-2.21367E-07
4	0.251327	4.646691	0.226665	3.075856	0.318311	0.969737	0.999999	-4.44469E-06
5	0.314159	4.8496	0.224324	3.067633	0.314601	0.952474	0.999994	-4.862E-05
6	0.376991	5.129181	0.221406	3.050587	0.309985	0.931153	0.999958	-0.000368187
7	0.439823	5.511991	0.217875	3.019612	0.304412	0.905655	0.999747	-0.002197145
8	0.502655	6.03667	0.213685	2.968146	0.297817	0.875858	0.998714	-0.011180856
9	0.565487	6.751064	0.208782	2.888469	0.290125	0.841643	0.994138	-0.051069037
10	0.628319	7.671321	0.203097	2.77269	0.281243	0.802906	0.975489	-0.215549675
11	0.69115	8.584856	0.196549	2.614639	0.271062	0.759571	0.908349	-0.834940401
12	0.753982	8.66193	0.189037	2.412358	0.259454	0.711606	0.729295	-2.741941048
13	0.816814	7.221721	0.18044	2.17014	0.246267	0.659038	0.458965	-6.764416683
14	0.879646	5.244258	0.170612	1.898693	0.231325	0.60197	0.236563	-12.5210788
15	0.942478	3.655433	0.159372	1.612825	0.21442	0.540599	0.108913	-19.25843322
16	1.00531	2.543062	0.146498	1.327728	0.195313	0.475219	0.045912	-26.71655646
17	1.068142	1.769331	0.131714	1.05576	0.173726	0.406237	0.017364	-35.20697681
18	1.130973	1.216154	0.114677	0.804959	0.149338	0.334167	0.005602	-45.03252902
19	1.193805	0.807652	0.094951	0.579209	0.121784	0.259624	0.001404	-57.05019352
20	1.256637	0.49692	0.071977	0.379262	0.090651	0.183303	0.000225	-72.94078802
21	1.319469	0.254479	0.045032	0.203923	0.055484	0.105959	1.37E-05	-97.24100773
22	1.382301	0.061231	0.013165	0.050992	0.015794	0.028371	1.84E-08	-154.6948463
23	1.445133	0.095602	0.024901	0.082098	0.02892	0.048687	2.75E-07	-131.2073754
24	1.507964	0.224826	0.070905	0.197911	0.079133	0.12448	3.11E-05	-90.15100853
25	1.570796	0.33268	0.127269	0.298817	0.135227	0.19834	0.000339	-69.38747224
26	1.633628	0.423687	0.197433	0.386921	0.197599	0.269688	0.001723	-55.27409616
27	1.69646	0.501201	0.286396	0.464044	0.26533	0.338047	0.005979	-44.46740421
28	1.759292	0.567753	0.40154	0.531738	0.339032	0.403046	0.016565	-35.61635136
29	1.822124	0.625285	0.55381	0.591317	0.416706	0.464422	0.039628	-28.03997885
30	1.884956	0.675308	0.758833	0.643887	0.496668	0.522009	0.085546	-21.35596542
31	1.947787	0.719015	1.03532	0.69038	0.57642	0.575727	0.170552	-15.36287511
32	2.010619	0.757359	1.38988	0.731578	0.653109	0.62557	0.314631	-10.04397813
33	2.073451	0.791106	1.766475	0.768142	0.723955	0.671589	0.521914	-5.648024813
34	2.136283	0.82088	2.00553	0.800629	0.786722	0.713882	0.740265	-2.61225423
35	2.199115	0.847193	2.002714	0.829508	0.840062	0.752575	0.889781	-1.01433366
36	2.261947	0.870468	1.85237	0.855179	0.883616	0.787819	0.959903	-0.355448695
37	2.324779	0.891054	1.675731	0.87798	0.917875	0.819773	0.986438	-0.118600368
38	2.38761	0.909243	1.521948	0.898199	0.943901	0.848603	0.995596	-0.038338018
39	2.450442	0.925281	1.398975	0.91608	0.96303	0.87447	0.998624	-0.011963468
40	2.513274	0.939372	1.302759	0.931831	0.976636	0.897533	0.999591	-0.003555967
41	2.576106	0.95169	1.227586	0.945629	0.985981	0.91794	0.999886	-0.000987274
42	2.638938	0.962378	1.168629	0.957624	0.992146	0.935825	0.999971	-0.000249446
43	2.70177	0.971557	1.122252	0.967942	0.996014	0.951314	0.999994	-5.53602E-05
44	2.764602	0.979329	1.085811	0.976688	0.998278	0.964516	0.999999	-1.02602E-05
45	2.827433	0.985775	1.057401	0.98395	0.999471	0.975525	1	-1.47028E-06
46	2.890265	0.990963	1.035657	0.9898	0.999993	0.984424	1	-1.43373E-07
47	2.953097	0.994946	1.019606	0.994294	1.000135	0.991277	1	-7.49802E-09
48	3.015929	0.997763	1.008576	0.997474	1.000102	0.996135	1	-1.23391E-10
49	3.078761	0.999442	1.002124	0.99937	1.000032	0.999036	1	-1.0704E-13

Tabel diatas dapat diplot menjadi kurva spektrum karakteristik BSF seperti berikut

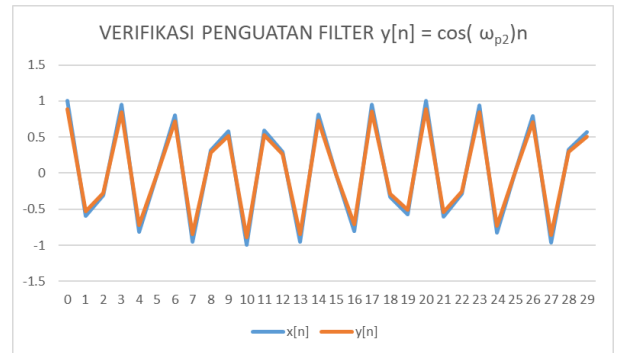


Gambar 4-2-1 Kurva Spektrum BSF

Kemudian dilakukan pengujian terakhir yaitu verifikasi untuk setiap batas, pendetailannya seperti berikut

Tabel 4-2-8 Proses Verifikasi terhadap Batas

Verifikasi Penguatan Filter											
$\omega_1 = \omega_{p1}$				$\omega_1 = \omega_{s1}$				$\omega_1 = \omega_{s2}$			
$\omega_1 = \omega_{p1}$	0.7			$\omega_1 = \omega_{s1}$	1.2			$\omega_1 = \omega_{s2}$	1.8		
$ H_1(\omega) $	0.67260013			$ H_1(\omega) $	0.77256652			$ H_1(\omega) $	0.60593729		
$ H_2(\omega) $	0.19555738			$ H_2(\omega) $	0.177425873			$ H_2(\omega) $	0.495085901		
$ H_3(\omega) $	2.588799107			$ H_3(\omega) $	0.558356487			$ H_3(\omega) $	0.571190818		
$ H_4(\omega) $	0.26951697			$ H_4(\omega) $	0.118880216			$ H_4(\omega) $	0.388983758		
$ H_5(\omega) $	0.753095327			$ H_5(\omega) $	0.252168349			$ H_5(\omega) $	0.443236676		
α	$\alpha(\omega)$	$\beta(\omega)$		α	$\alpha(\omega)$	$\beta(\omega)$		α	$\alpha(\omega)$	$\beta(\omega)$	
0	1	0.891251		0	1	0.002296		0	1	0.029544	
1	0.764842	0.681666		1	0.362338	0.000832		1	-0.2272	-0.00671	
2	0.109867	0.151483		2	-0.73739	-0.00109		2	-0.89676	-0.02649	
3	-0.50485	-0.46494		3	-0.89676	-0.00206		3	0.64693	0.01871	
4	-0.94222	-0.83976		4	0.087499	0.000201		4	0.608351	0.017973	
5	-0.93646	-0.83462		5	0.96017	0.002205		5	-0.91113	-0.02692	
6	-0.49626	-0.43695		6	0.608351	0.001397		6	-0.19433	-0.00574	
7	0.186112	0.168229		7	-0.51923	0.00119		7	0.99433	0.02927	
8	0.775566	0.691224		8	-0.98469	0.00226		8	-0.25982	-0.00768	
9	0.99859	0.891125		9	-0.19433	-0.00045		9	0.581322	0.018104	
10	0.753902	0.671916		10	0.843854	0.001938		10	0.660317	0.019508	
11	0.153374	0.136699		11	0.805884	0.001851		11	0.581322	0.017175	
12	-0.51929	-0.46282		12	-0.25982	-0.0006		12	-0.92447	-0.02711	
13	-0.94772	-0.84666		13	-0.99418	-0.00228		13	-0.16124	-0.00476	
14	-0.93043	-0.82924		14	-0.46068	-0.00106		14	0.997739	0.029477	
15	-0.47954	-0.42382		15	0.660317	0.001516		15	-0.29214	-0.00863	
16	0.20205	0.180728		16	0.39322	0.001127		16	-0.86499	-0.02156	
17	0.78607	0.700586		17	0.020351	4.67e-05		17	0.685194	0.020243	
18	0.999435	0.890747		18	-0.24447	-0.00212		18	0.553635	0.016357	
19	0.742749	0.661976		19	-0.09033	-0.00159		19	-0.93677	-0.02768	
20	0.126717	0.121867		20	0.424179	0.000744		20	-0.12795	-0.00278	
21	-0.53358	-0.47556		21	0.997739	0.002291		21	0.994915	0.029394	
22	-0.95295	-0.84932		22	0.298898	0.000686		22	-0.32413	-0.00958	
23	-0.92413	-0.82363		23	-0.78112	-0.00179		23	-0.84763	-0.02504	
24	-0.46068	-0.41058		24	-0.86499	-0.00139		24	0.792954	0.020951	
25	-0.21944	-0.195576		25	0.154251	0.000354		25	0.525322	0.01552	
26	-0.796352	-0.70975		26	0.976778	0.002243		26	-0.948	-0.02801	
27	-0.99728	-0.890117		27	0.533635	0.001271		27	-0.98457	-0.02179	
28	-0.731386	-0.651849		28	-0.75255	-0.00132		28	0.990966	0.029277	
29	-0.120062	-0.107005		29	-0.97075	-0.00223		29	-0.35575	-0.01051	

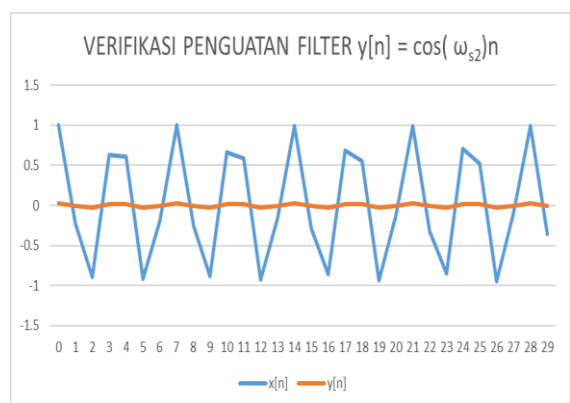
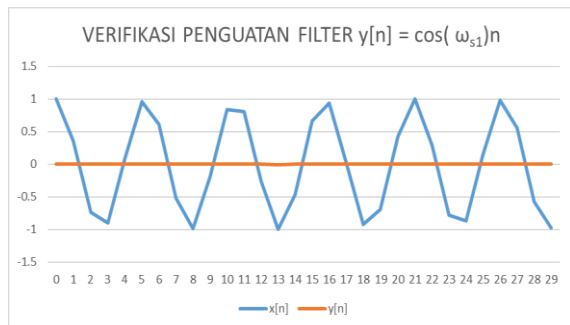
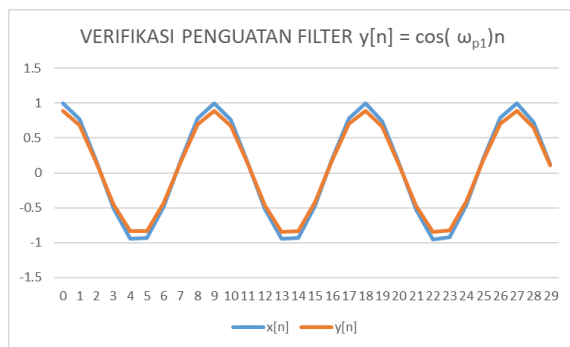


Dari keempat grafik dapat disimpulkan bahwa filter rancangan susah tepat dan sesuai spesifikasi

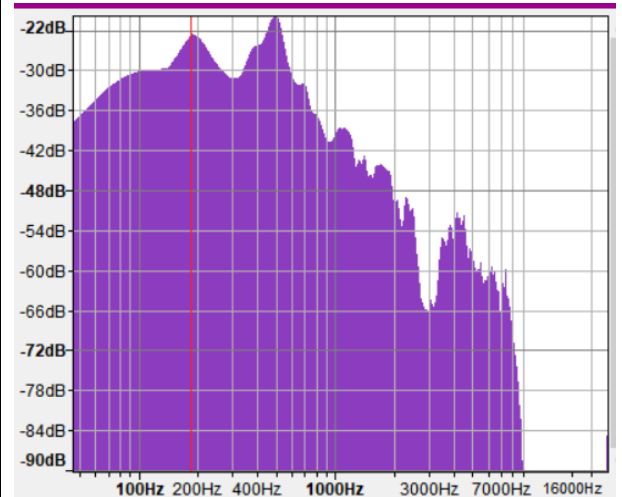
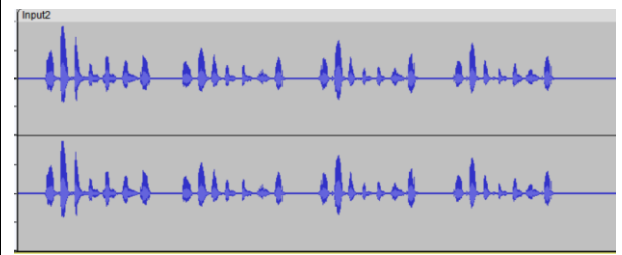
4.3 SOAL 3 : MODULASI AMPLITUDO

Berikut keseluruhan grafik yang dihasilkan pada setiap proses rangkaian modulasi .

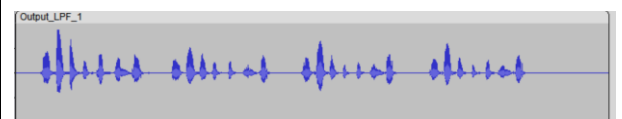
Untuk setiap batas, dihasilkan grafik seperti berikut

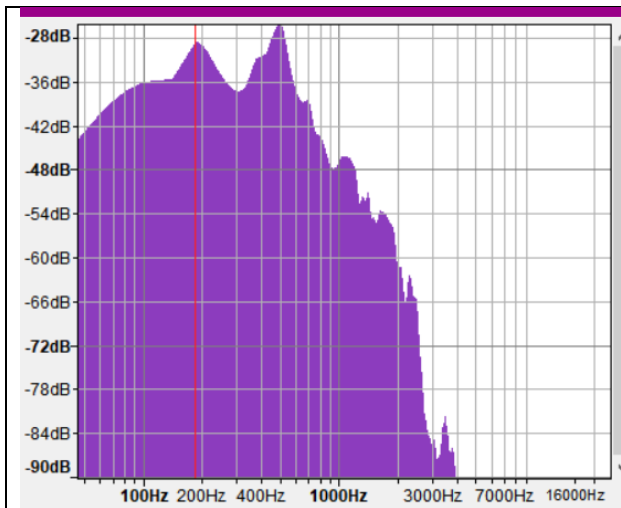


Sinyal input



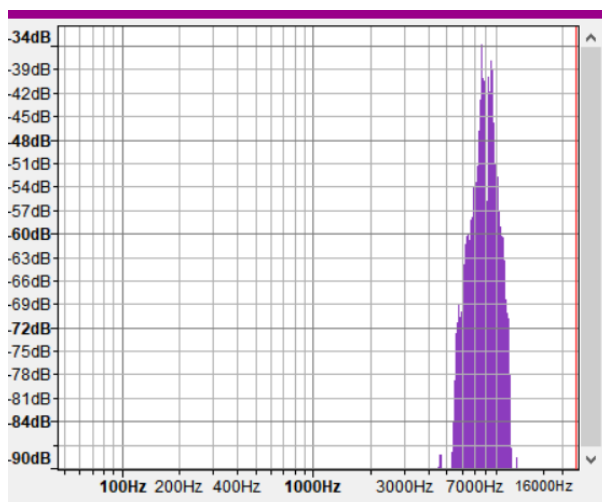
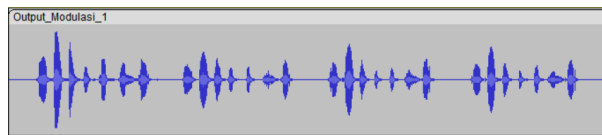
Sinyal Hasil Pemfilteran



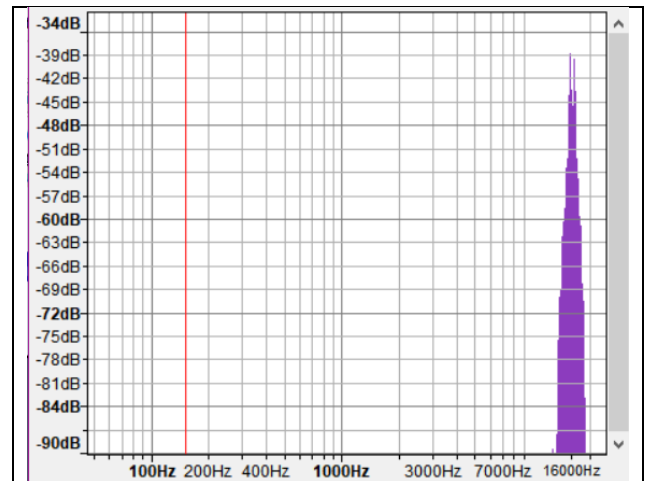
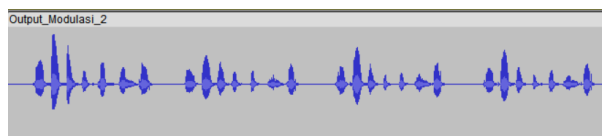


Sinyal Hasil Modulasi

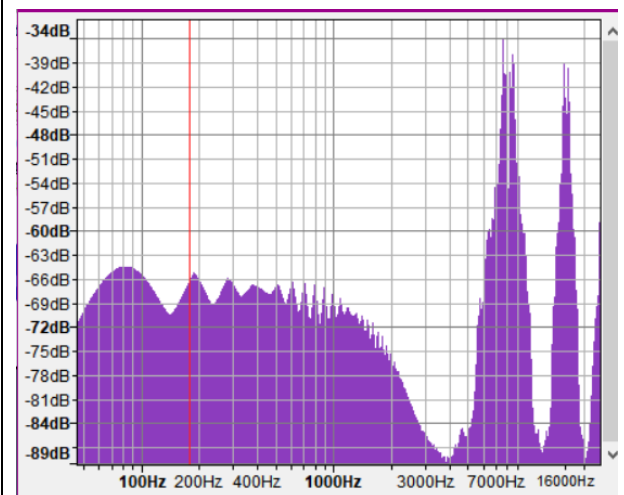
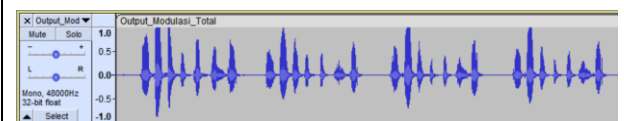
Untuk 8000 Hz



Untuk 16000 Hz

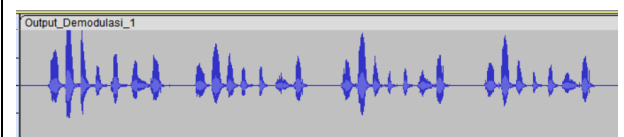


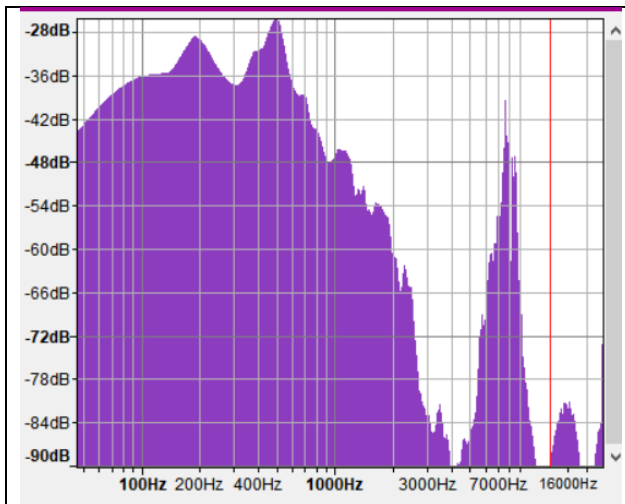
MODulasi total



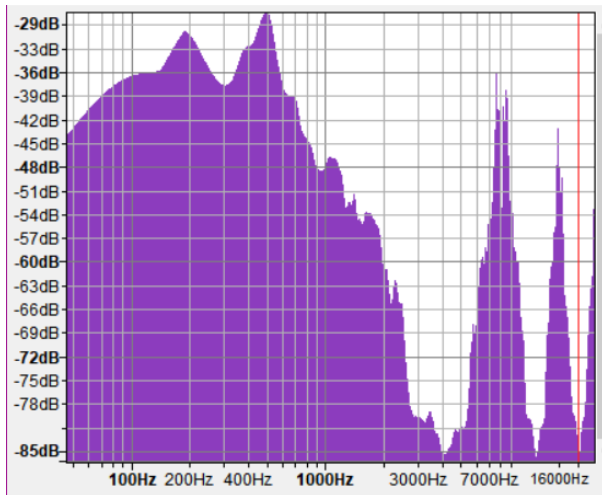
Sinyal Hasil Demodulasi

Untuk 8000 Hz

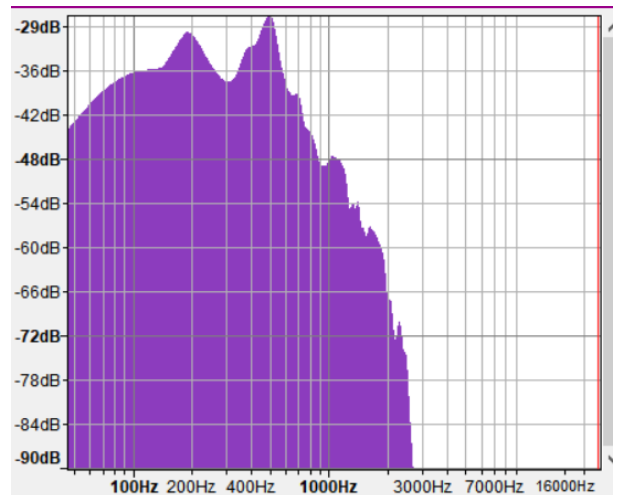
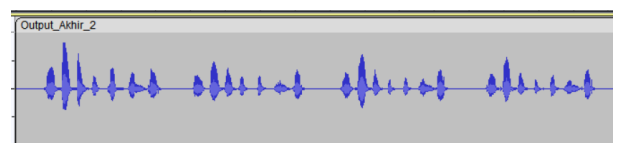
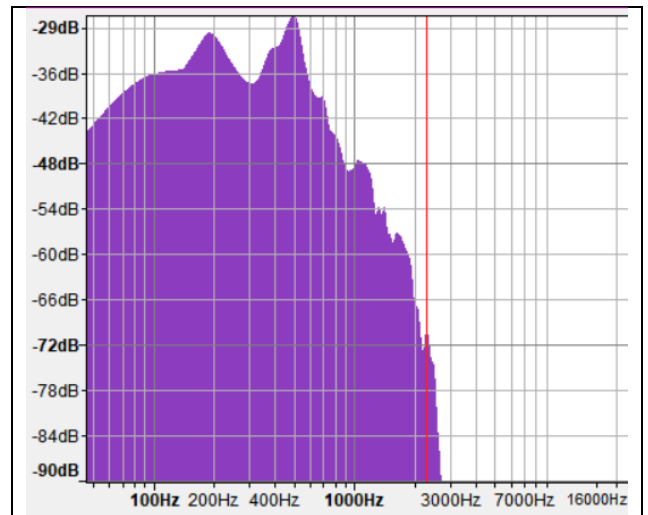
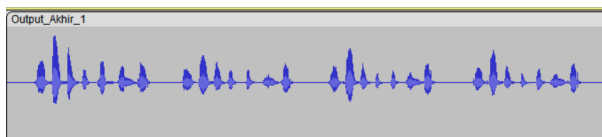




Untuk 16000 Hz



Sinyal Hasil Pemfilteran / Akhir



Proses yang dilakukan pertama kali yaitu melakukan pemfilteran terhadap sinyal input menggunakan Low-Pass Filter dengan tujuan untuk menghilangkan sinyal-sinyal pada frekuensi di atas 4000 Hz agar dapat dilakukan modulasi kepada dua sinyal input tersebut. Filter yang digunakan berorde 32

Kemudian modulasi sudah dapat dilakukan dimana proses ini akan melakukan konvolusi sinyal input dengan sinyal pembawa (carrier). Untuk sinyal input 1 akan digunakan sinyal carrier dengan frekuensi 8000Hz dan sinyal carrier untuk modulasi input ke dua yaitu 16000Hz

Dari gambar di atas, terlihat sinyal yang mula-mula berada pada rentang frekuensi yaitu 0 sampai 4000Hz berubah sesuai gambar di atas., karena sudah ter"gabung" dengan sinyal carrier. Sehingga modulasi sudah berjalan dengan baik. Ketika sinyal hasil modulasi didengarkan, sinyal dengan frekuensi carrier 8000 Hz memiliki suara yang tidak jelas dan ada seperti suara jangkrik yang sangat nyaring. Untuk modulasi 16000 Hz, suara makin tidak jelas dan makin berdecit tederngarnya

Setelah dilakukannya penggabungan, proses selanjutnya yaitu demodulasi. Terlihat hasil demodulasi seperti gabungan sinyal input dan carrier baik itu 8000 Hz maupun 16000 Hz. Untuk mengembalikan sinyal input seperti awal, maka dilakukan pemfilteran LPF kembali agar sinyal frekuensi tinggi (carrier) tidak diloloskan.

Dari semua tahap, dapat dikatakan rancangan kode program yang dibuat telah berhasil

*catatan : file audio yang dipakai adalah file suara teman mahasiswa lain yang diminta tolong, karena perangkat microphone sedang dalam kondisi yang baik Ketika melakukan perekaman sehingga suara yang dihasilkan amat kecil dan tidak dapat diproses kode

5. KESIMPULAN

- Filter LPF yang dirancang telah memenuhi spesifikasi yang diinginkan dengan menggunakan spreadsheet excel
- Langkah-langkah yang dilalui dalam proses perancangan filter meliputi spesifikasi,

menentukan jenis windows, mencari koefisien filter, dan memverifikasi hasil filter

- Diperoleh nilai penguatan filter ketika input berupa sinyal sinusoidal dengan frekuensi sebesar frekuensi cut-off adalah sebesar 0.5.
- Filter BSF yang dirancang telah memenuhi spesifikasi yang diinginkan dengan menggunakan spreadsheet excel
- Langkah-langkah dalam merancang bandpass filter digital IIR meliputi mendeklarasikan spesifikasi, menghitung frekuensi hasil transformasi bilinear, mendesain filter lowpass analog, Realisasi Filter Lowpass Analog dalam Cascade Orde Dua, Transformasi Frekuensi Dari LP Analog orde satu ke BP Analog orde dua, lakukan transformasi bilinear dari bandpass analog ke digital, lakukan verifikasi.
- Proses modulasi dan demodulasi berfungsi dengan baik.
- Modulasi merupakan suatu proses perubahan suatu gelombang sehingga menjadi sinyal yang dapat membawa suatu informasi.
- Demodulasi merupakan proses pemisahan antara sinyal carrier dan sinyal informasi. Tujuan dari demodulasi adalah memperoleh sinyal informasi dari sinyal gabungan antara sinyal informasi dan sinyal carrier

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Langi, Armein Z. R., Transformasi Frekuensi Dan Aplikasinya Pada Desain Filter Analog dan Digital, 2010.
- [2] Hutabarat, Mervin T., Petunjuk Praktikum Pengolahan Sinyal Digital, 2021.
- [3] Proakis, John G., Digital Signal Processing 3th Edition, 2013.

LAMPIRAN

1. Kode MATLAB soal Nomor 3

```
clear;
%Melakukan Audioread
[y1,Fs]=audioread('Input2.wav');

yleft = y1(:,1)';
yright = y1(:,2)';

%Membuat LPF dengan orde 32
koef = fir1(32,4000/Fs,'low');

%Proses pemfilteran sampel suara 1 dan penyimpanan output 1
y_out_1 = conv(yleft,koef);
audiowrite('Output_LPF_1.wav', y_out_1, Fs);

%Proses pemfilteran sampel suara 2 dan penyimpanan output 2
y_out_2 = conv(yright,koef);
audiowrite('Output_LPF_2.wav', y_out_2, Fs);

%Proses Modulasi dan Menyimpan Output Modulasi
mod_8k = ammod(y_out_1,8000,Fs);
audiowrite('Output_Modulasi_1.wav',mod_8k,48000);

mod_16k = ammod(y_out_2,16000,Fs);
audiowrite('Output_Modulasi_2.wav',mod_16k,48000);

mod_tot = mod_8k + mod_16k;
audiowrite('Output_Modulasi_Total.wav',mod_tot,48000);

%Melakukan Proses Demodulasi dan Menyimpan Output Demodulasi
amdemod_8k = amdemod(mod_tot,8000,Fs);
audiowrite('Output_Demodulasi_1.wav',amdemod_8k,48000);

amdemod_16k = amdemod(mod_tot,16000,Fs);
audiowrite('Output_Demodulasi_2.wav',amdemod_16k,48000);

%Pemfilteran terhadap Output Demodulasi
y_end_1 = filter(koef, 1, amdemod_8k);
audiowrite('Output_Akhir_1.wav',y_end_1,48000);

y_end_2 = filter(koef, 1, amdemod_16k);
audiowrite('Output_Akhir_2.wav',y_end_2,48000);
```