

LAPORAN PROYEK AKHIR PENGOLAHAN SINYAL DIGITAL ANALISIS FILTER FIR DAN IIR PADA SAMPLE MUSIK

Dosen pengampu:

Bagaskoro Saputro, S.Si., M.Cs.
Vera Noviana Sulistyawan, S.T., M.T.



Kelompok 6:

Fajar Dwi Kurniawan (5312422001)
Nadya Dwi Zalsabila Usman (5312422010)
Saputra Adi Nugraha (5312422040)

PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2024

PENDAHULUAN

Sinyal audio sering digunakan sebagai sarana untuk menyebarkan informasi, namun seringkali terganggu oleh kebisingan lingkungan sekitarnya. Oleh karena itu, filter diperlukan untuk mengurangi atau menghilangkan gangguan tersebut [1]. *Filtering* digunakan pada perangkat audio untuk membersihkan sinyal suara, sehingga suara yang dihasilkan menjadi lebih jernih [2]. Filter digital adalah algoritma matematika yang diterapkan pada perangkat keras atau perangkat lunak untuk mencapai tujuan penyaringan [3]. Secara umum, filter digital terbagi menjadi dua jenis, yaitu *Finite Impulse Response* (FIR) dan *Infinite Impulse Response* (IIR) [3]. Filter FIR adalah filter yang memiliki respon impuls dengan durasi terbatas karena karakteristiknya yang menurun ke nol dalam jangka waktu tertentu [4]. Filter FIR dirancang dengan fase linear untuk memastikan bahwa bentuk gelombangnya tidak mengalami distorsi atau kebisingan, karena panjang filternya tetap konstan [1]. Sedangkan Filter IIR adalah filter digital yang memanfaatkan rekursif atau umpan balik untuk mengatur stabilitas sistemnya [5]. FIR biasanya digunakan untuk mencapai fase linear dan keluaran yang stabil, sedangkan IIR seringkali digunakan karena sifatnya yang tidak selalu linier, namun dapat diatur sedemikian rupa agar tetap stabil [1].

Dalam perancangan filter FIR dan IIR untuk audio, terdapat banyak jenis metode, salah satunya menggunakan metode *windowing* [2]. Metode *windowing* digunakan untuk mendapatkan respon frekuensi ideal dari filter dan menghitung respon impulsnya. Sistem kerja *windowing* sangat dipengaruhi oleh fungsi *window* yang digunakan, sehingga penting untuk membandingkan berbagai fungsi *window* tersebut [6]. Fungsi *window* merupakan fungsi matematika yang digunakan dalam pemrosesan sinyal untuk mengurangi atau menghilangkan efek dari karakteristik yang tidak diinginkan, seperti kebocoran spektral dan efek tepi yang mungkin terjadi saat menganalisis sinyal berdurasi terbatas [7]. Pada laporan ini, fungsi *window* yang digunakan pada FIR meliputi *rectangular*, *triangular*, *hamming*, dan *hanning*. Sedangkan fungsi *window* yang digunakan pada IIR adalah filter *Butterworth*, *Chebyshev type I* dan *II*, filter *Elliptic*, serta filter *Bessel*.

Pada laporan ini, Filter FIR dan IIR diimplementasikan dalam tiga jenis, yaitu *Low-Pass*, *Band-Pass*, dan *High-Pass*. *Low-Pass Filter* adalah proses untuk meratakan transisi yang tajam pada sebuah citra dengan mempertahankan data pada frekuensi rendah dan mengurangi kekuatan frekuensi tinggi [8]. *Low-Pass Filter* dicapai dalam domain frekuensi dengan menghapus komponen frekuensi tinggi [9]. *Band-Pass Filter* adalah filter yang melewati rentang frekuensi tertentu, memungkinkan hanya satu pita frekuensi untuk dilewatkan sementara melemahkan semua frekuensi di luar pita tersebut. Filter ini merupakan hasil gabungan dari *Low-Pass* dan *High-Pass* [10]. *High-Pass Filter* adalah filter yang membiarkan frekuensi sinyal tinggi melewatinya atau mengizinkan sinyal di atas frekuensi *cut-off*, sementara menekan atau menahan frekuensi rendah di bawah frekuensi *cut-off* [11].

Tujuan laporan ini adalah untuk menganalisis sampel lagu dengan menerapkan filter FIR dan IIR dengan tiga jenis implementasi, yaitu *Low*, *Band*, dan *High*, serta menggunakan *window variation* seperti *Rectangle*, *Triangular*, *Hamming*, *Hanning*, *Chebyshev*, *Butterworth*, *Elliptic*, dan *Bessel*. Analisis tersebut bertujuan untuk memahami perubahan dalam respons impuls dan frekuensi dari sampel lagu tersebut.

DASAR TEORI

A. FIR (*Finite Impulse Response*)

FIR merupakan salah satu elemen dasar dalam sistem pemrosesan sinyal digital [1]. FIR adalah filter yang memiliki respons impuls dengan durasi terbatas karena karakteristiknya yang menurun ke nol dalam jangka waktu tertentu [4]. FIR dirancang dengan fase linear untuk memastikan bahwa bentuk gelombangnya tidak mengalami distorsi atau kebisingan, karena panjang filternya tetap konstan [1]. FIR memiliki arsitektur yang hemat daya dengan biaya efisien, namun tetap menghasilkan *throughput* tinggi dengan kompleksitas rendah. FIR sangat cocok digunakan untuk pemrosesan sinyal berbasis waktu [12].

B. IIR (*Infinite Impulse Response*)

IIR adalah tipe filter digital yang memanfaatkan rekursi atau umpan balik untuk mengatur stabilitas sistemnya [5]. Filter digital IIR memiliki respon impuls tak terbatas, sehingga cocok untuk disesuaikan dengan filter analog yang juga memiliki respon impuls berdurasi tak terbatas [6][1]. IIR memiliki struktur rekursif dengan *loop* umpan balik. Akurasi karakteristik frekuensi amplitudonya sangat tinggi, dan filter IIR tidak memiliki fase linear [1]. Filter IIR sering digunakan dalam aplikasi di mana respons frekuensi yang sangat akurat dan efisien dalam hal jumlah koefisien yang dibutuhkan lebih diutamakan daripada stabilitas fase.

C. *Window variation*

Metode *windowing* digunakan untuk mendapatkan respon frekuensi ideal dari filter dan menghitung respons impulsnya [6]. Sistem kerja *windowing* sangat dipengaruhi oleh fungsi window yang digunakan, sehingga penting untuk membandingkan berbagai fungsi *window* tersebut [6]. Dalam laporan ini fungsi *windowing* pada FIR meliputi *rectangular*, *triangular*, *hamming*, dan *hanning*. Sedangkan fungsi *windowing* pada filter IIR meliputi filter *Butterworth*, *Chebyshev type I* dan *II*, *filter Elliptic*, serta filter *Bessel*. Fungsi *window* merupakan fungsi matematika yang digunakan dalam pemrosesan sinyal untuk mengurangi atau menghilangkan efek dari karakteristik yang tidak diinginkan, seperti kebocoran spektral dan efek tepi yang mungkin terjadi saat menganalisis sinyal berdurasi terbatas [7]. Setiap fungsi *window* memiliki karakteristik yang unik dalam domain waktu dan frekuensi, termasuk redaman lobus samping dan lebar transisi yang berbeda-beda [14].

D. Low-Pass Filter

Low-Pass Filter adalah proses untuk meratakan transisi yang tajam pada sebuah citra dengan mempertahankan data pada frekuensi rendah dan mengurangi kekuatan frekuensi tinggi [8]. *Low-Pass Filter* dicapai dalam domain frekuensi dengan menghapus komponen frekuensi tinggi [9]. Berdasarkan penelitian [15], *Low-Pass Filter* digunakan untuk membatasi frekuensi audio pada sistem komunikasi suara guna meningkatkan kapasitas kanal komunikasi. *Low-Pass Filter* ini didesain dengan frekuensi *cut-off* tertentu untuk memastikan hanya frekuensi rendah yang dilewatkan, sehingga mengurangi *noise* dan memperbaiki kualitas sinyal dalam sistem komunikasi.

E. Band-Pass Filter

Band-Pass Filter adalah jenis filter yang memungkinkan melewatkannya suatu rentang frekuensi tertentu. Filter ini hanya membiarkan satu pita melewati frekuensi, sementara melemahkan semua frekuensi di luar pita tersebut. *Band-Pass Filter* merupakan gabungan dari *Low-Pass Filter* dan *High-Pass Filter* [10]. Berdasarkan penelitian [16], *Band-Pass* adalah rentang frekuensi atau pita frekuensi (*frequency band*) yang diloloskan oleh filter ke keluaran, yang disebut sebagai pita lolos (*pass band*). Filter ini membiarkan frekuensi dalam rentang tertentu melewati, sementara frekuensi di luar rentang tersebut, yang disebut *stop band*, diredam. Lebar pita frekuensi kerja filter tergantung pada rentang frekuensi operasi serta fungsi filter tersebut.

F. High-Pass Filter

High-Pass Filter memungkinkan frekuensi di atas frekuensi *cut-off* untuk dilewatkan, sementara frekuensi di bawahnya diredam. Filter ini membiarkan frekuensi sinyal tinggi melewati atau mengizinkan sinyal di atas frekuensi *cut-off*, sementara melemahkan atau menahan frekuensi rendah di bawah frekuensi *cut-off* [11][17]. Berdasarkan penelitian [18] *High-Pass Filter* memungkinkan frekuensi tinggi di atas titik *cut-off* untuk melewati frekuensi, sehingga bermanfaat menghilangkan konten frekuensi rendah dari sinyal audio. *High-Pass Filter* digunakan dalam perekaman studio dan peningkatan suara untuk menghapus noise frekuensi rendah yang tidak diinginkan. Penggunaan *High-Pass Filter* pada ucapan atau vokal dapat meningkatkan kejelasan suara. Aspek utama dalam *High-Pass Filter* adalah bagaimana kecuraman dari titik *cut-off* frekuensi terjadi [18].

METODE PENELITIAN

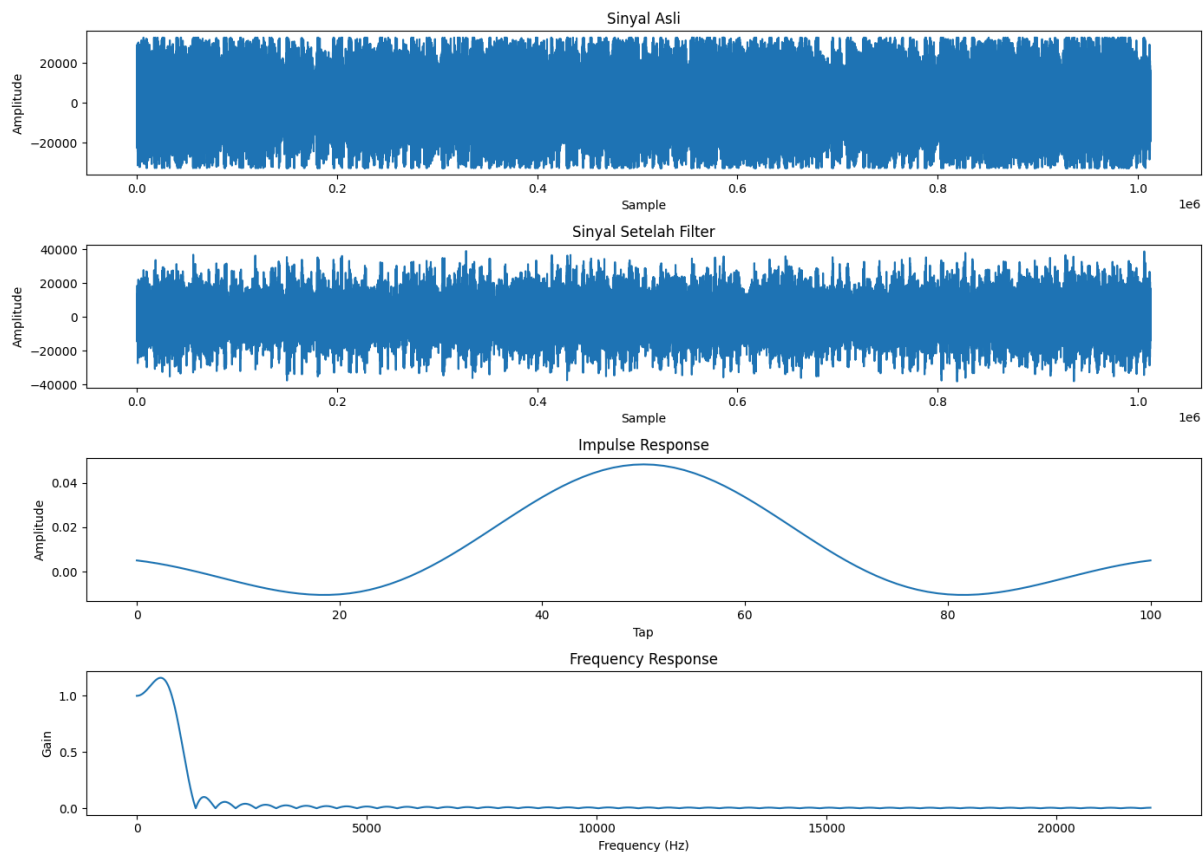
Metode penelitian eksperimental digunakan dalam analisis ini untuk secara sistematis mengevaluasi efek berbagai filter digital pada pengolahan sinyal lagu. Penelitian ini dimulai dengan pemilihan sampel lagu *Fitz And The Tantrums - Out Of My League* untuk memastikan generalisasi hasil. Lagu-lagu ini kemudian direkam dengan kualitas tinggi dan diproses menggunakan perangkat lunak pengolahan sinyal digital seperti *Python* dengan *library SciPy* dan *NumPy* untuk plot dan juga menggunakan *Google Colabs* untuk running *source code*. Setiap proses menganalisis sinyal juga dilakukan dengan beberapa jenis filter, termasuk FIR dengan fungsi *window Rectangular, Triangular, Hamming*, dan *Hanning*, serta IIR dengan filter *Chebyshev, Butterworth, Elliptic*, dan *Bessel*. Parameter filter diatur secara konsisten untuk memastikan validitas perbandingan. Setelah pemrosesan, sinyal asli dan sinyal yang telah difilter dianalisis menggunakan alat analisis spektral untuk mengukur perubahan dalam spektrum frekuensi dan amplitudo. Hasil analisis ini kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria objektif seperti reduksi *noise* dan kejernihan suara, serta penilaian subjektif dari panel pendengar. Data yang diperoleh dari eksperimen ini dianalisis secara statistik untuk menentukan signifikansi perbedaan antara jenis filter. Metode eksperimental ini memungkinkan peneliti untuk mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang kinerja dan efektivitas berbagai filter digital dalam pengolahan sinyal musik, serta memberikan dasar yang kuat untuk rekomendasi praktis dalam aplikasi industri.

HASIL DAN ANALISIS

A. Low Pass Filter

a. Finite Impulse Response (FIR)

1. Rectangular Window



Analisa filter FIR dengan *rectangular window* pada *low pass filter*.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter.

Sinyal Asli digambarkan pada subplot pertama, menunjukkan bentuk gelombang audio mentah dari file WAV yang dibaca. Bentuknya kompleks mewakili sampling musik “Fitz And The Tantrums - Out Of My League” dari detik 00:47 - 01:07. Sinyal terfilter ditampilkan pada subplot kedua, merepresentasikan hasil penerapan filter *low-pass*. Gelombang tampak lebih halus karena frekuensi tinggi diredam, menghasilkan suara yang lebih "tenang".

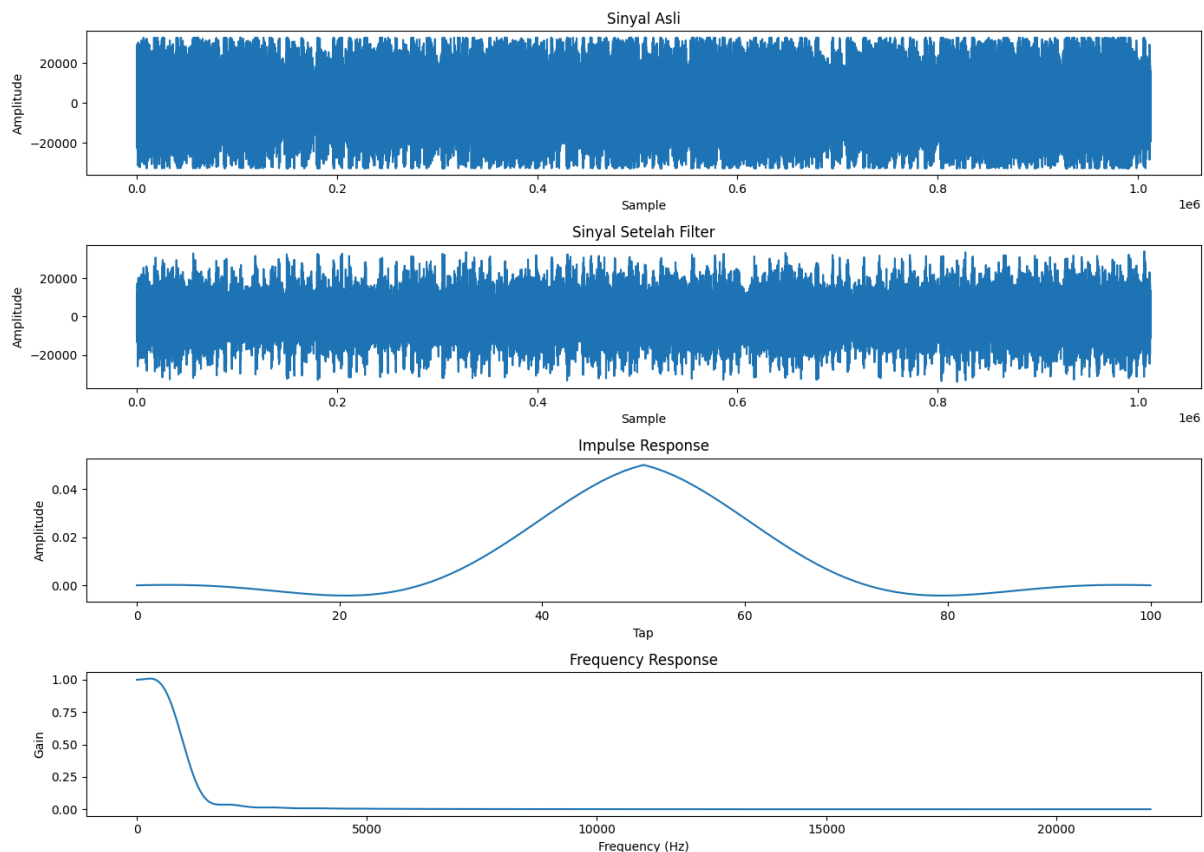
- *Impulse Response*.

Subplot ketiga menunjukkan *impulse response* filter yang merupakan respon filter terhadap input *impulse* tunggal. Bentuknya simetris di sekitar nol, dengan lobus utama di tengah dan lobus samping yang lebih kecil. Lobus utama yang lebih sempit menghasilkan *cutoff* filter yang lebih tajam antara *passband* and *stopband*, tetapi meningkatkan frekuensi di *passband*. Sebaliknya, lobus utama yang lebih lebar menghasilkan transisi yang lebih halus tetapi atenuasi yang lebih sedikit di *stopband*.

- *Frequency Response.*

Subplot keempat menampilkan respon frekuensi filter. Ini menunjukkan seberapa besar filter meredam atau memperkuat frekuensi yang berbeda. Filter *low-pass* ideal akan memiliki respons datar sempurna di *passband* (di mana frekuensi diizinkan melewati tanpa atenuasi) dan respons nol di *stopband* (di mana frekuensi benar-benar diredam). Namun, karena *window rectangular* digunakan untuk desain filter, respon frekuensi aktual memiliki riak di *passband* dan *stopband*.

2. Triangular Window



Analisa filter FIR dengan *triangular window* pada *low pass filter*.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter.

Plot ke-1 menggambarkan data audio mentah sebelum pemfilteran. Bentuk gelombang mencerminkan karakteristik audio asli seperti nada, warna suara, dan kenyaringan. Plot ke-2 menunjukkan sinyal audio setelah diproses oleh *low-pass filter*. Bentuk gelombang yang lebih mulus dengan fluktuasi yang lebih sedikit. Hal ini terjadi karena filter menghilangkan komponen frekuensi tinggi, sehingga menghasilkan versi audio yang tidak terlalu “berisik”.

- *Impulse Response.*

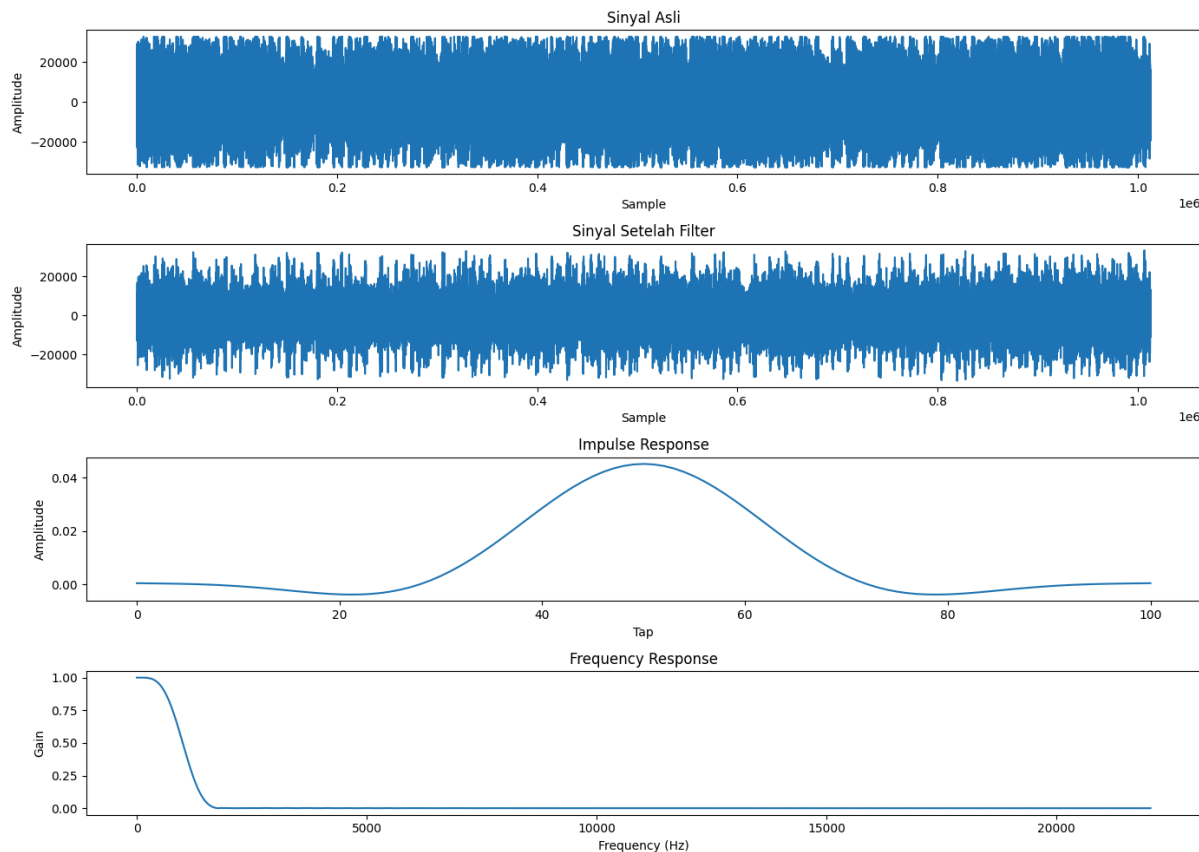
Plot ke-3 menggambarkan respons filter terhadap impuls tunggal yang singkat (lonjakan pada waktu nol) dengan dominasi komponen frekuensi rendah di awal respon impuls (puncak positif di sekitar tap ke-20) dan penurunan menuju nol, menandakan pelemahan komponen frekuensi tinggi. *Ringing* minimal terlihat setelah

puncak awal, dan nilai *steady state* dicapai sekitar tap ke-80, menunjukkan waktu settling yang cepat. Secara keseluruhan, filter memungkinkan komponen frekuensi rendah lewat dengan distorsi minimal dan melemahkan frekuensi tinggi dengan efektif.

- *Frequency Response.*

Plot ke-4 pada grafik frekuensi *cut-off* diperkirakan sekitar 1000 Hz, di mana terjadi penurunan gain yang signifikan, menunjukkan filter efektif melemahkan komponen sinyal di atas 1000 Hz. Setelah frekuensi *cut-off*, gain terus menurun seiring peningkatan frekuensi, menunjukkan pelemahan komponen frekuensi tinggi yang semakin efektif. Gain mendekati 0 dB pada frekuensi rendah, menunjukkan filter memungkinkan komponen sinyal frekuensi rendah lewat dengan distorsi minimal. Analisa ini konsisten dengan fungsi *low-pass filter*, melemahkan frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah, dengan frekuensi *cut-off* sekitar 1000 Hz dan pelemahan lebih besar pada frekuensi lebih tinggi.

3. Hamming Window



Analisa filter FIR dengan *hamming window* pada low pass filter.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter.

Plot ke-1 dan ke-2 menunjukkan efek filter pada sinyal audio. Sinyal asli mengandung frekuensi yang lebih luas, sedangkan sinyal yang difilter tampak lebih mulus, yang berpotensi mengindikasikan penghilangan komponen frekuensi tinggi.

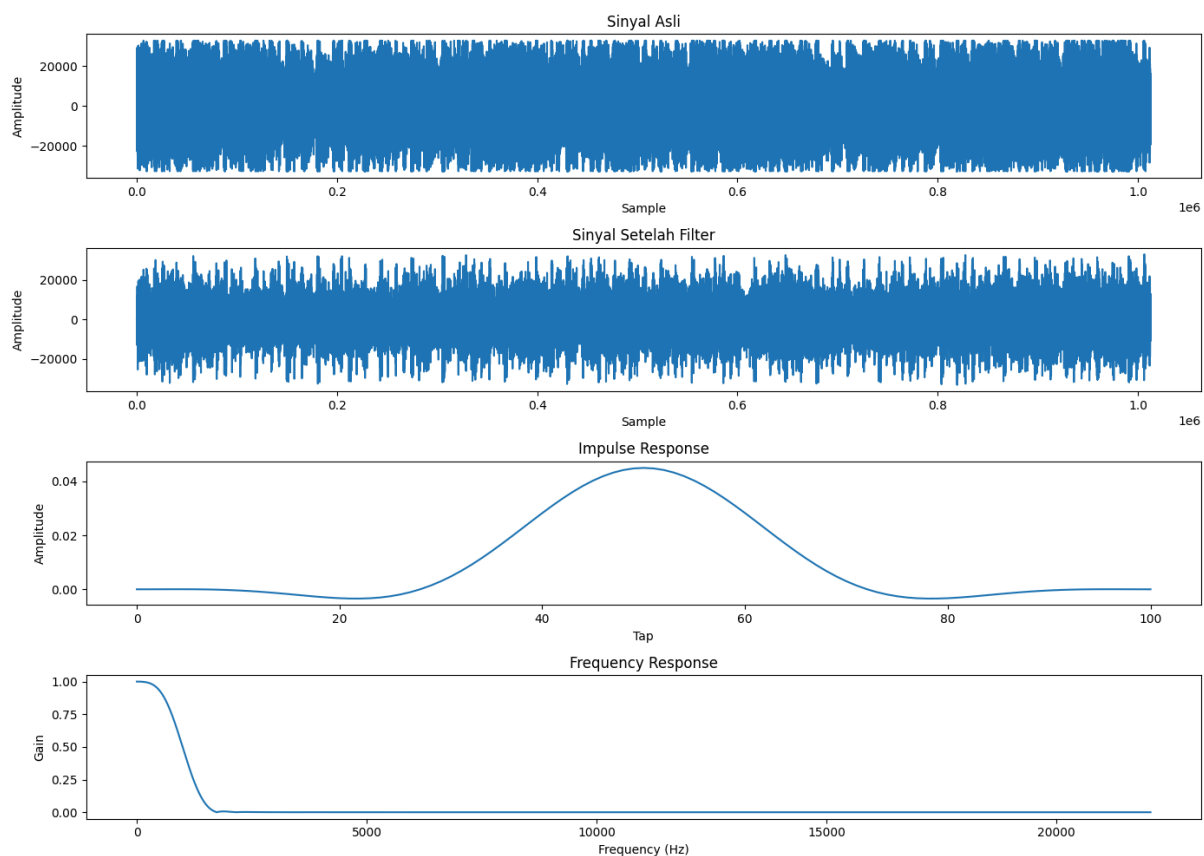
- *Impulse Response.*

Plot ke-3 filter ini menunjukkan dominasi frekuensi rendah dengan puncak positif awal yang signifikan, mengindikasikan kemampuan meloloskan sinyal frekuensi rendah. Respon yang menurun menuju nol menunjukkan pelemahan frekuensi tinggi, dengan laju penurunan dan level akhir yang menandakan efektivitas filter. Sedikit osilasi terlihat setelah puncak awal, namun masih dalam batas wajar, dan waktu settling yang cepat menunjukkan dari impuls awal. Secara keseluruhan, filter ini efektif sebagai filter lolos rendah, memprioritaskan frekuensi rendah, melemahkan frekuensi tinggi, dengan osilasi minimal dan waktu *settling* cepat.

- *Frequency Response*.

Plot ke-4 menunjukkan penurunan gain signifikan sekitar frekuensi *cut-off* 1000 Hz, mengindikasikan lokasi frekuensi tersebut. Setelah frekuensi *cut-off*, gain terus menurun, menunjukkan tingkat *roll-off* filter, di mana kemiringan yang lebih curam menandakan transisi tajam antara *passband* dan *stopband*. Dalam *passband*, idealnya gain mendekati 0 dB, dengan variasi minimal yang menunjukkan sedikit atenuasi atau amplifikasi untuk frekuensi rendah. Di *stopband*, level atenuasi tinggi dalam dB menandakan efektivitas filter dalam menghilangkan komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan.

4. Hanning Window



Analisa filter FIR dengan *hanning window* pada *low pass filter*.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter.

Sinyal asli memiliki amplitudo yang bervariasi secara signifikan dan mengandung banyak komponen frekuensi tinggi. Setelah di filter sinyal terlihat lebih halus menunjukkan bahwa komponen frekuensi tinggi telah berkurang.

- *Impulse Response.*

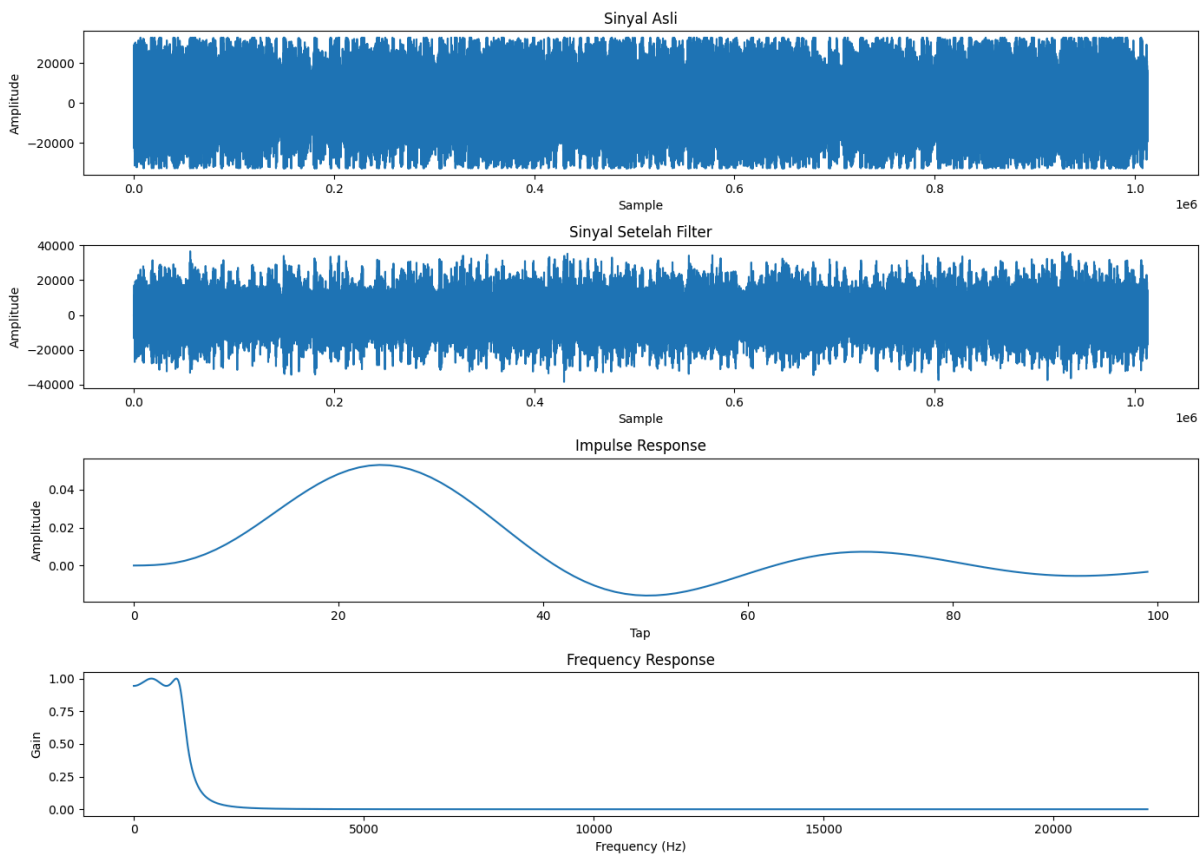
Plot menunjukkan distribusi koefisien filter. Jendela Hann memiliki transisi yang halus di kedua ujungnya untuk mengurangi efek kebocoran spektral yang merupakan karakteristik dari filter dengan jendela Hann.

- *Frequency Response.*

Respons frekuensi menunjukkan bahwa filter ini adalah filter lowpass dengan frekuensi cutoff sekitar 1000 Hz. Gain filter turun drastis setelah frekuensi cutoff, menunjukkan bahwa frekuensi di atas 1000 Hz telah dikurangi secara signifikan.

b. Infinite Impulse Response (IIR)

1. Chebyshev Window



Analisa filter IIR dengan *chebyshev window* pada *low pass filter*.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter

Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo yang luas dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan filter *Chebyshev*, sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi tinggi secara signifikan, mempertahankan komponen frekuensi rendah dengan ripple yang dapat terlihat di dalam passband.

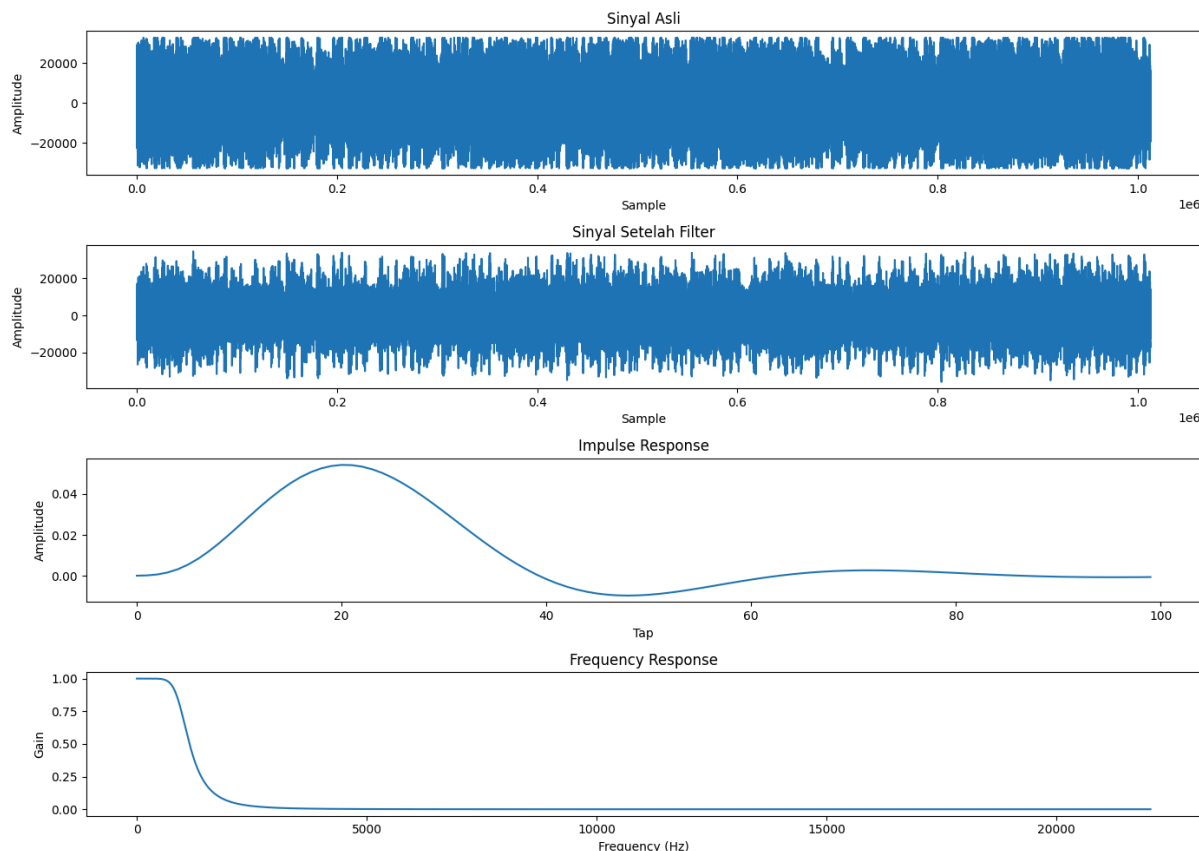
- *Impulse Response*

Respons impuls dari filter *Chebyshev* menunjukkan penurunan eksponensial yang cepat dengan osilasi yang menonjol, mencerminkan karakteristik ripple pada *passband*.

- *Frequency Response*

Respons frekuensi menunjukkan roll-off yang sangat curam di sekitar tepi *passband* dengan *ripple* dalam *passband* dan *stopband*, yang memberikan pemotongan frekuensi tinggi yang tajam.

2. *Butterworth Window*



Analisa filter IIR dengan *butterworth window* pada *low pass filter*.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter

Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo yang luas dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan filter *Butterworth*, sinyal hasil filter sangat halus dengan pemotongan frekuensi tinggi yang gradual, mempertahankan komponen frekuensi rendah tanpa *ripple* yang signifikan.

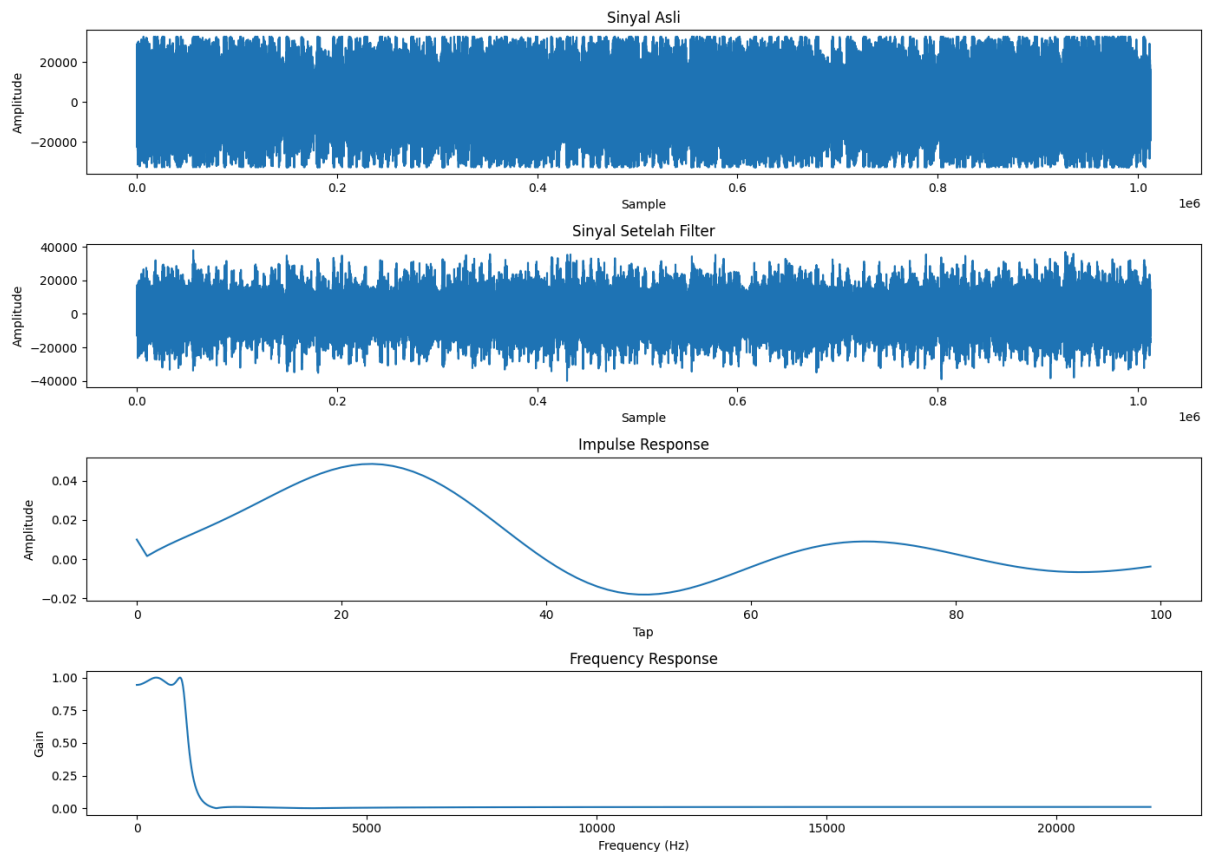
- *Impulse Response*

Respons impuls dari filter *Butterworth* menunjukkan penurunan eksponensial yang halus tanpa osilasi yang signifikan, menunjukkan transisi yang mulus dan stabil.

- *Frequency Response*

Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang lebih gradual, tanpa ripple dalam *passband* and *stopband*, memberikan pemotongan frekuensi tinggi yang halus.

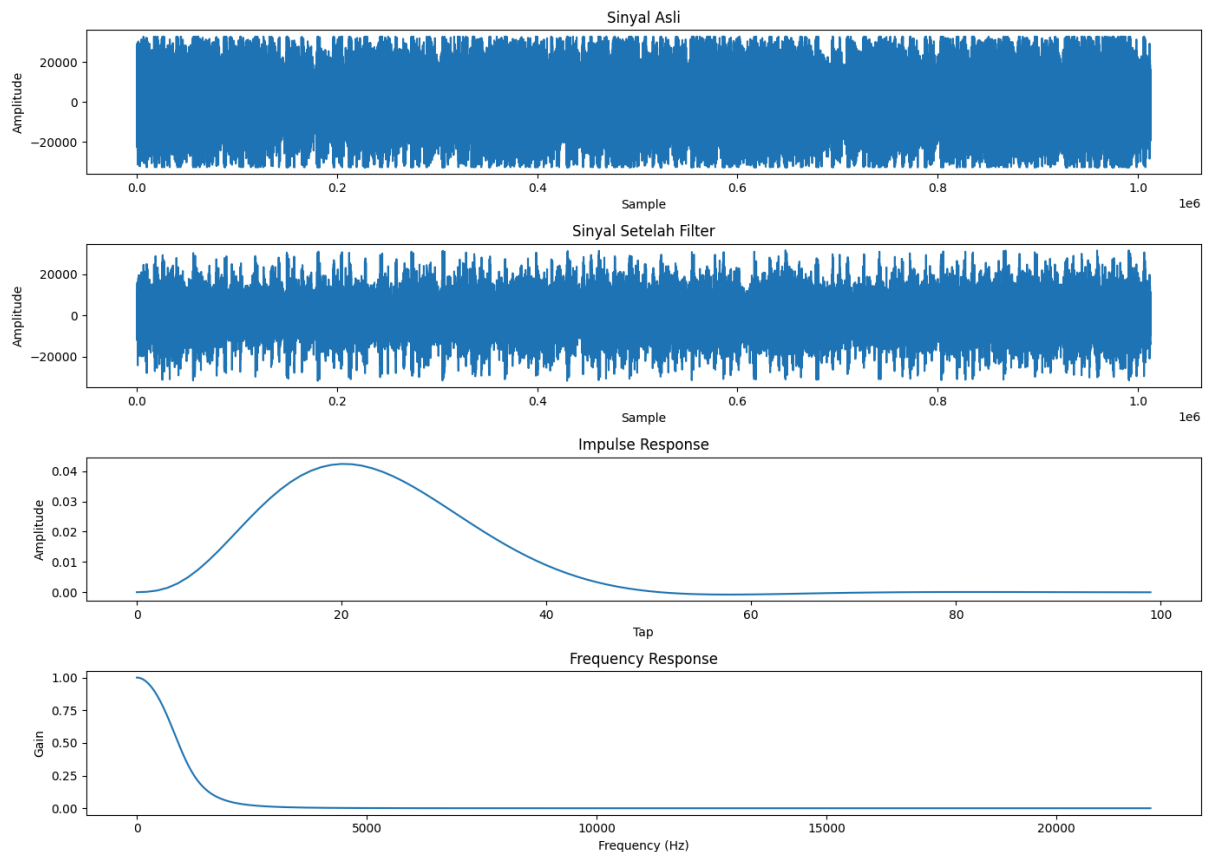
3. *Elliptic Window*



Analisa filter IIR dengan elliptic window pada low pass filter.

- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo yang luas dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan filter *Elliptic*, sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi tinggi yang sangat selektif dengan *ripple* yang terlihat dalam *passband* dan *stopband*, mempertahankan komponen frekuensi rendah dengan baik.
- **Impulse Response**
Respons impuls dari filter *Elliptic* menunjukkan penurunan eksponensial dengan osilasi signifikan yang mencerminkan karakteristik *ripple* yang lebih tinggi.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang sangat curam dengan *ripple* yang signifikan dalam *passband* dan *stopband*, memberikan pemotongan frekuensi tinggi yang sangat tajam.

4. Bessel Window



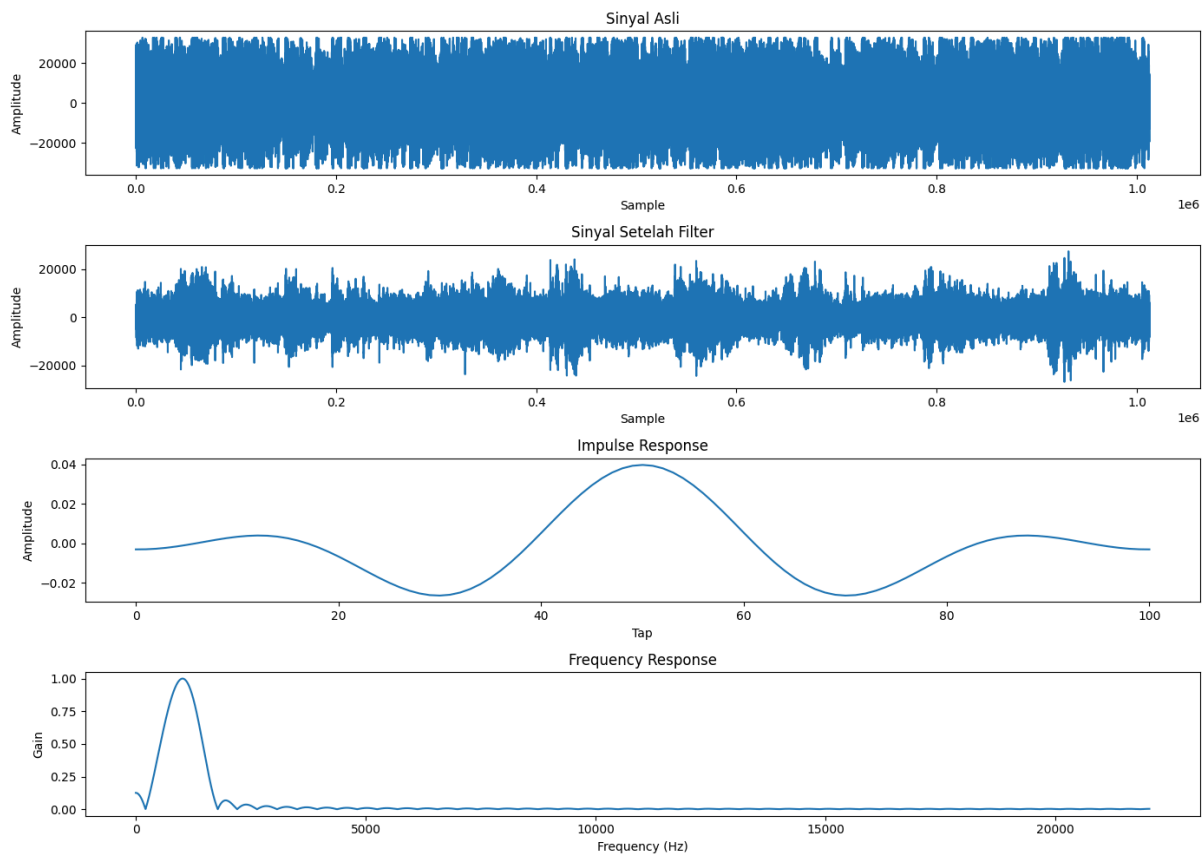
Analisa filter IIR dengan *bessel window* pada *low pass filter*.

- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo yang luas dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi tinggi dengan respons fase yang sangat linier, mempertahankan komponen frekuensi rendah dengan baik.
- *Impulse Response*
Respons impuls dari filter Bessel menunjukkan penurunan eksponensial yang sangat halus dengan sedikit atau tanpa osilasi, mencerminkan respons fase linier yang baik.
- *Frequency Response*
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang gradual dengan minim *ripple*, memberikan transisi frekuensi tinggi yang sangat halus dan respons fase linier yang ideal.

B. Band Pass Filter

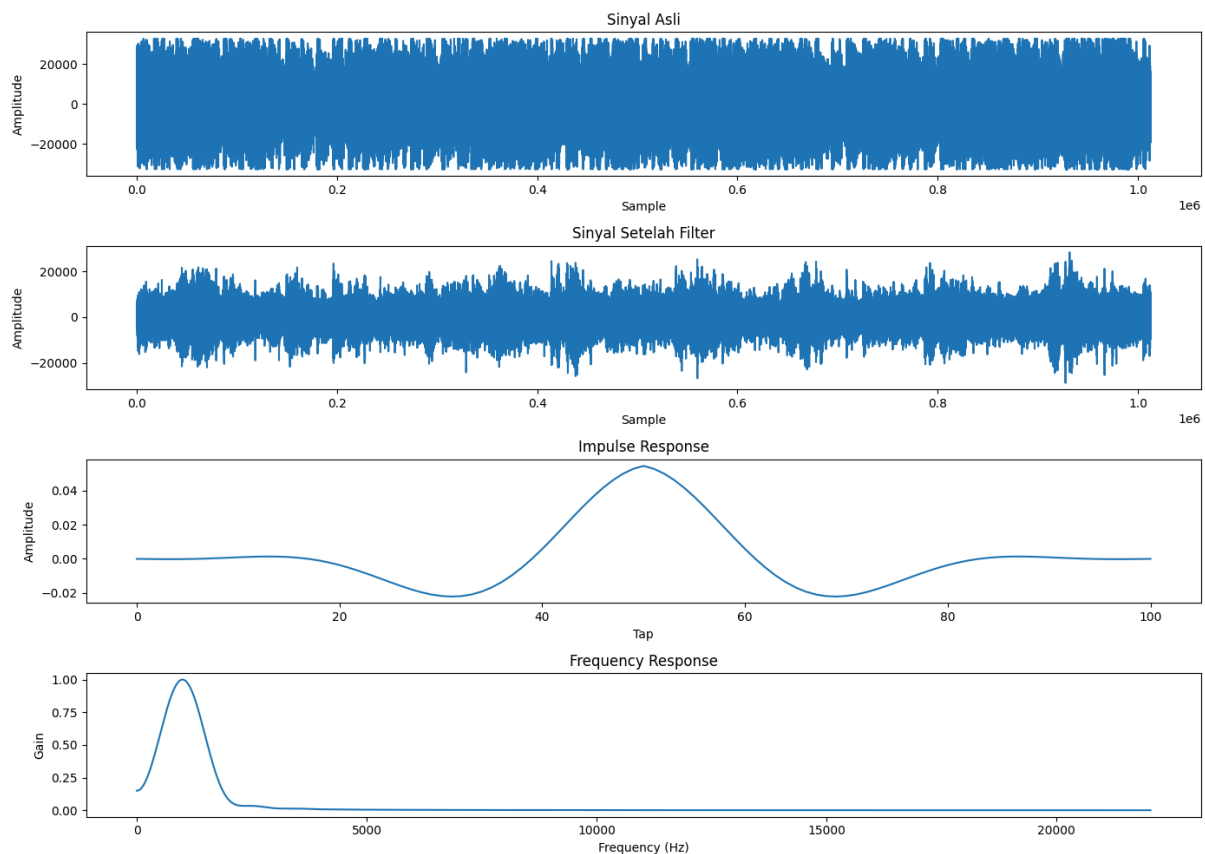
a. Finite Impulse Response (FIR)

1. Rectangular Window



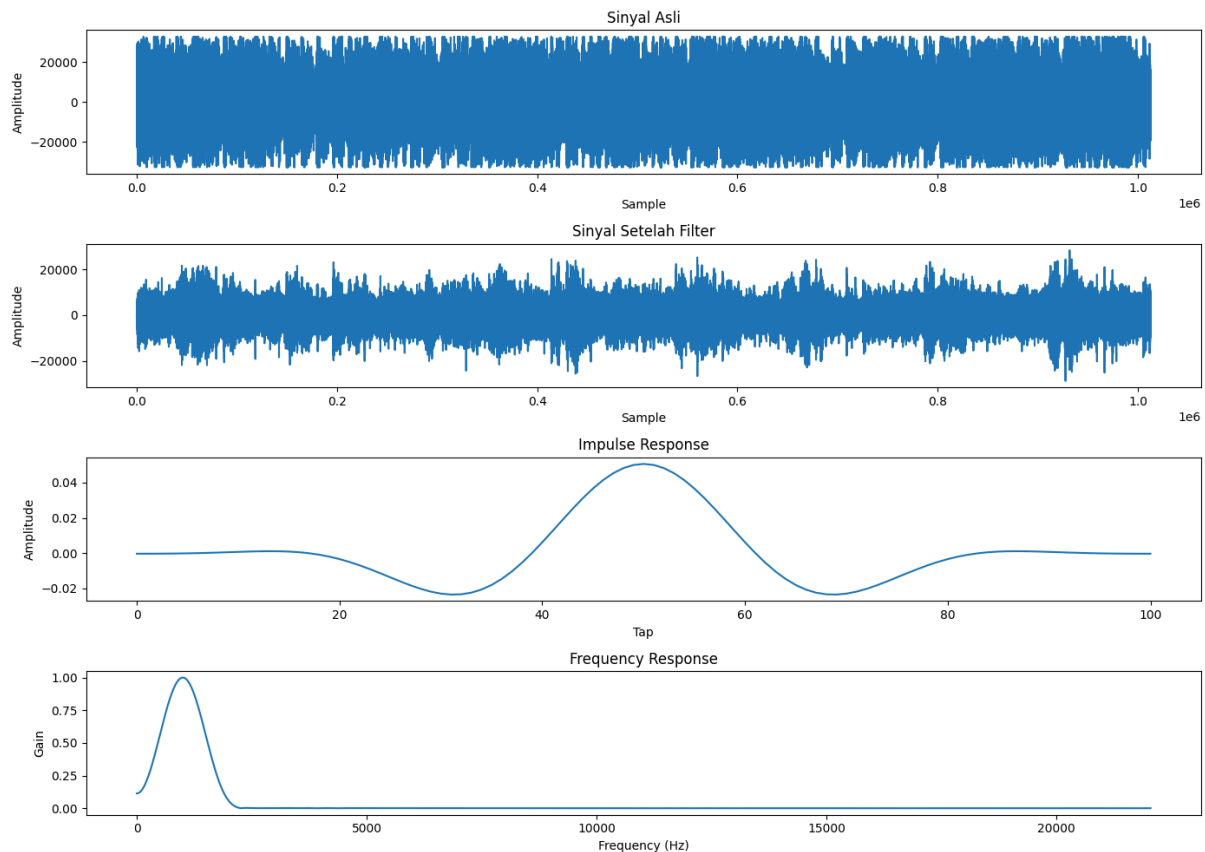
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan amplitudo yang bervariasi secara acak dengan frekuensi yang tersebar luas. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter menunjukkan beberapa frekuensi tertentu yang dipertahankan sementara frekuensi lainnya dihilangkan.
- **Impulse Response**
Respons impuls berbentuk seperti deret konstan dengan panjang tertentu sesuai dengan panjang filter. Ini menunjukkan bahwa semua titik dalam jendela berkontribusi secara sama terhadap sinyal keluaran.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi dari filter ini menunjukkan lobe utama yang sempit dengan *sidelobe* yang tinggi. Hal ini menyebabkan ripple yang signifikan dalam *band pass filter*.

2. Triangular Window



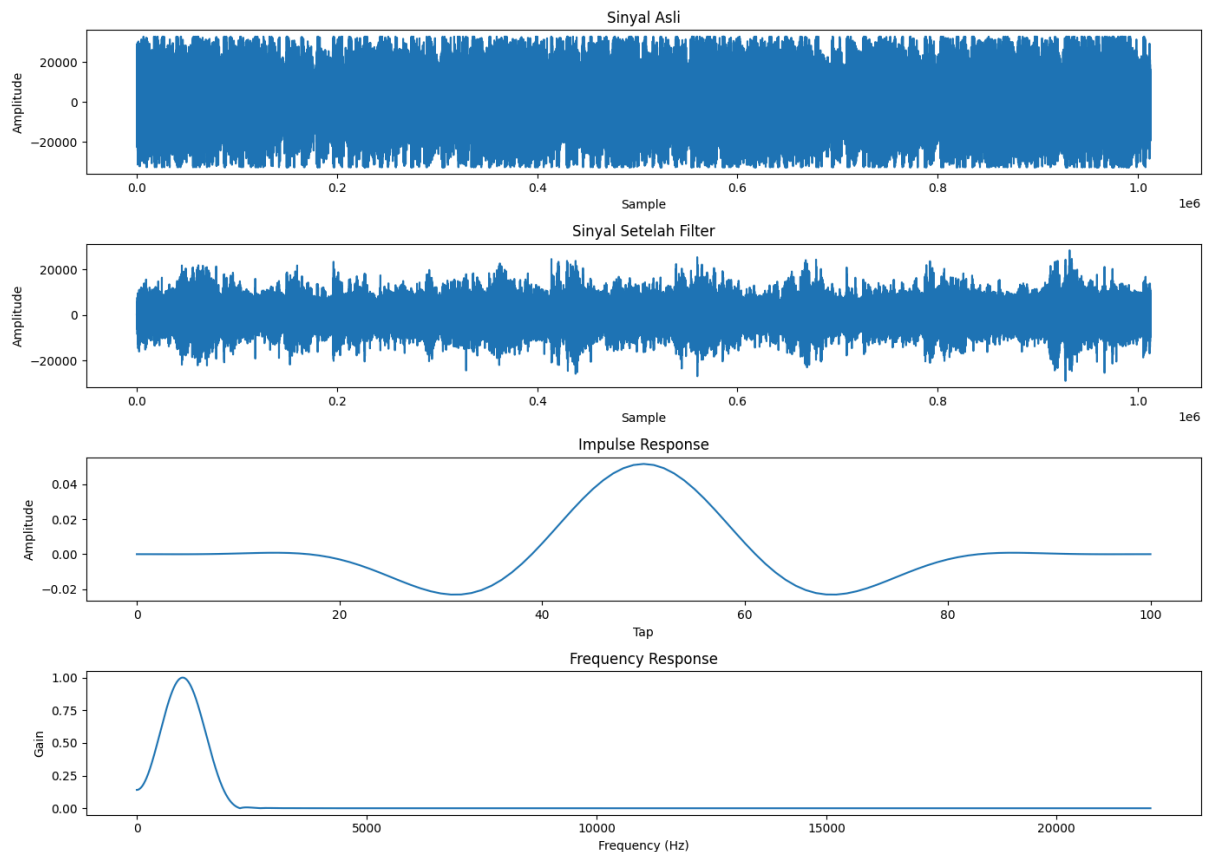
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter lebih halus, dengan beberapa frekuensi tertentu dipertahankan.
- **Impulse Response**
Respons impuls dari filter dengan jendela triangular menunjukkan bentuk segitiga simetris, di mana nilai amplitudo menurun secara linear dari tengah jendela.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi dari filter ini memiliki lobe utama yang lebih lebar, namun sidelobe-nya lebih rendah sehingga menghasilkan ripple yang lebih kecil.

3. Hamming Window



- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter lebih halus dengan frekuensi yang lebih selektif.
- **Impulse Response**
Respons impuls dari filter dengan jendela Hamming memiliki bentuk sinusoidal yang dipotong, yang memberikan transisi yang lebih halus di tepi jendela.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi dari filter ini menunjukkan lobe utama yang sempit dan *sidelobe* rendah yang memberikan ripple yang lebih sedikit dalam *band pass filter*.

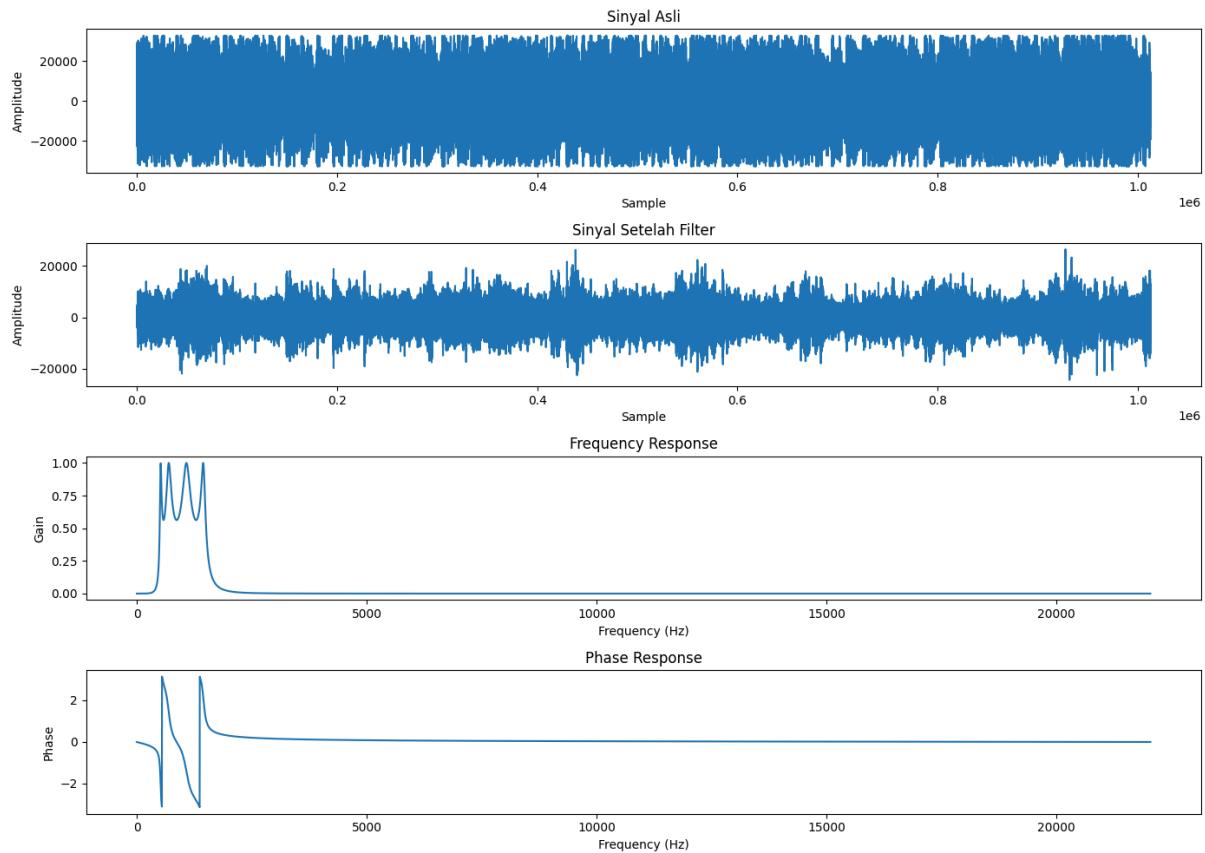
4. Hanning Window



- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter sangat halus dengan frekuensi yang lebih terfokus.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan bentuk sinusoidal halus yang memberikan transisi yang sangat mulus di tepi jendela.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi dari filter ini memiliki lobe utama yang sangat sempit dan sidelobe yang sangat rendah, memberikan performa yang baik dalam mengurangi ripple di band pass filter.

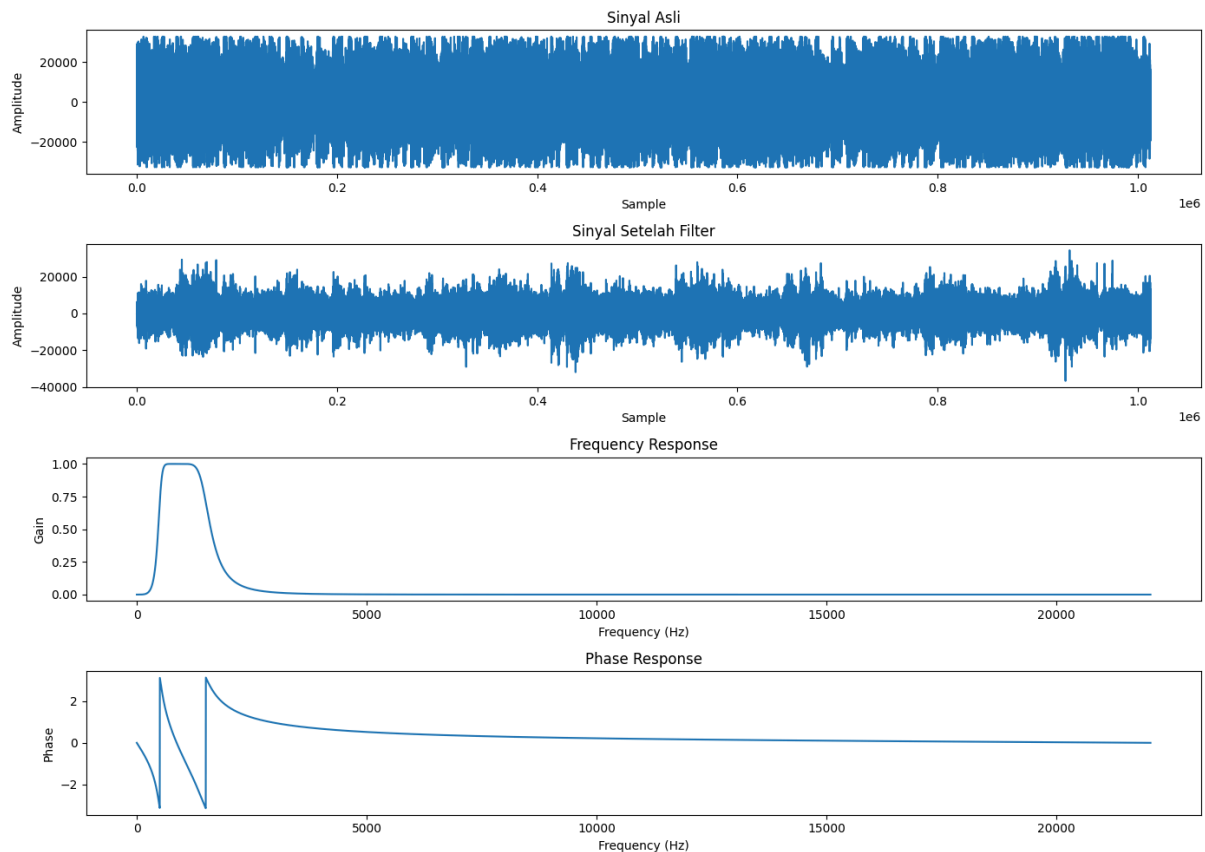
b. Infinite Impulse Response (IIR)

1. Chebyshev Window



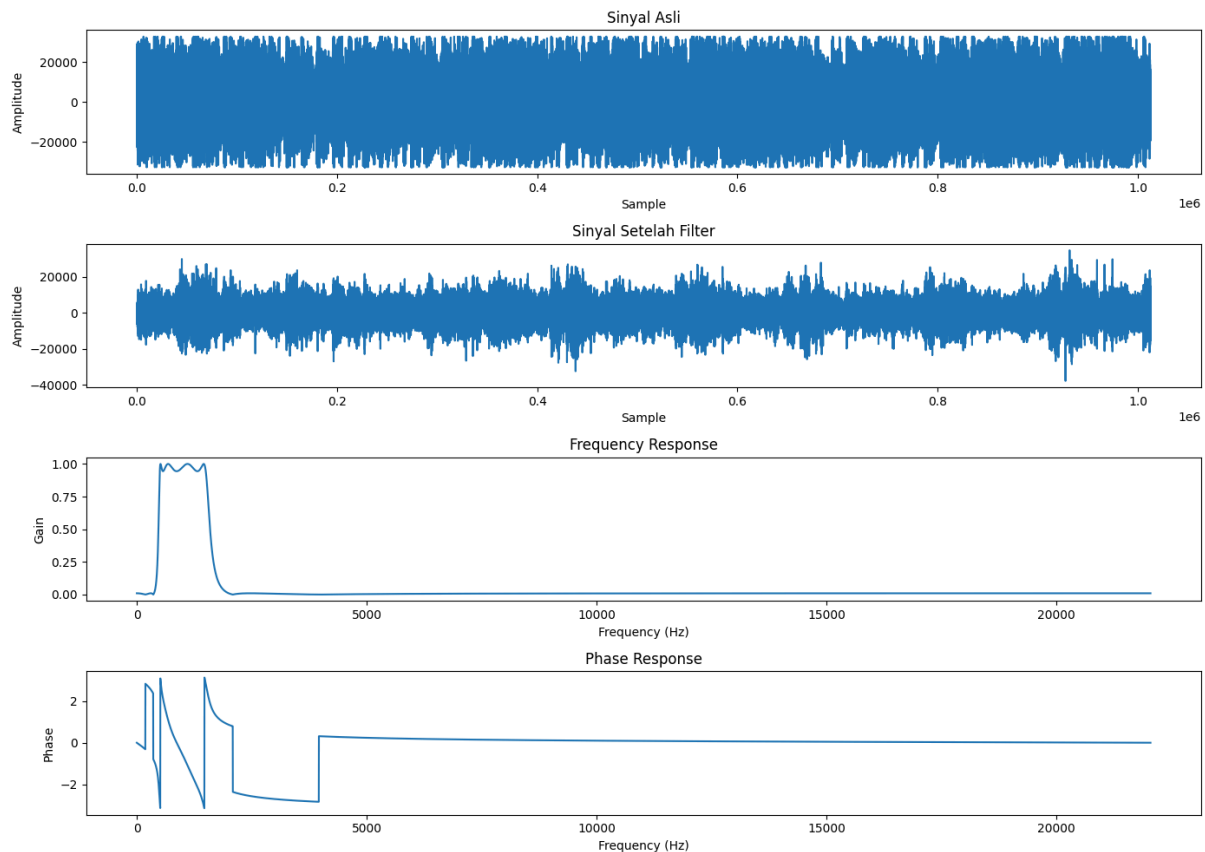
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi dengan selektivitas tinggi namun dapat menampilkan ripple dalam band pass.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan penurunan eksponensial dengan osilasi dalam amplitudo, mencerminkan karakteristik *ripple* pada *band pass*.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang curam di sekitar tepi *band pass* dengan *ripple* dalam *band pass* dan *stopband*.

2. Butterworth Window



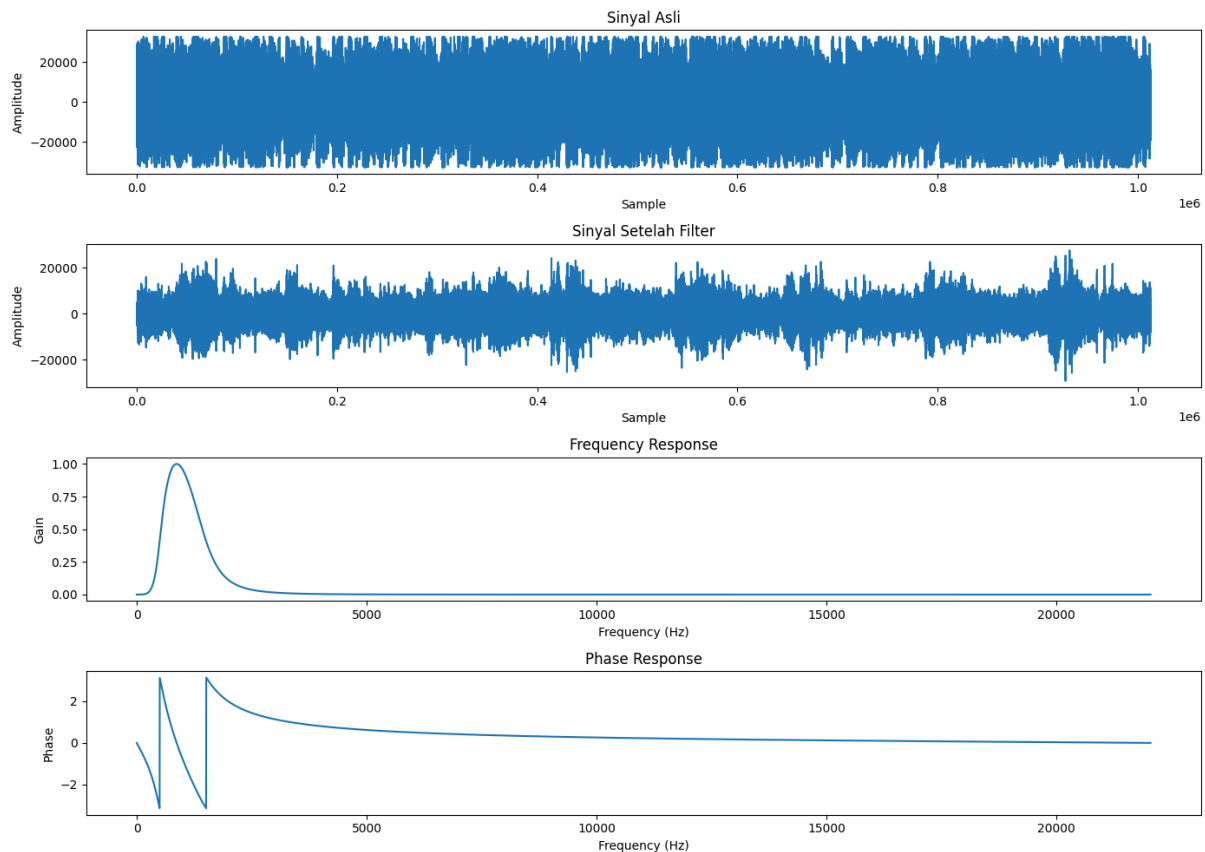
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Setelah diterapkan filter Butterworth, sinyal hasil filter sangat halus dengan pemotongan frekuensi yang gradual.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan penurunan eksponensial yang halus tanpa osilasi, menunjukkan transisi yang mulus.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang lebih *gradual*, tanpa ripple dalam band pass atau stopband.

3. *Elliptic Window*



- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi yang sangat selektif dengan ripple di band pass dan stopband.
- ***Impulse Response***
Respons impuls dari filter Elliptic menunjukkan penurunan eksponensial dengan osilasi signifikan yang menunjukkan ripple yang lebih tinggi.
- ***Frequency Response***
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang sangat curam dengan ripple yang signifikan di *band pass* dan *stopband*, memberikan pemotongan frekuensi yang sangat tajam.

4. Bessel Window

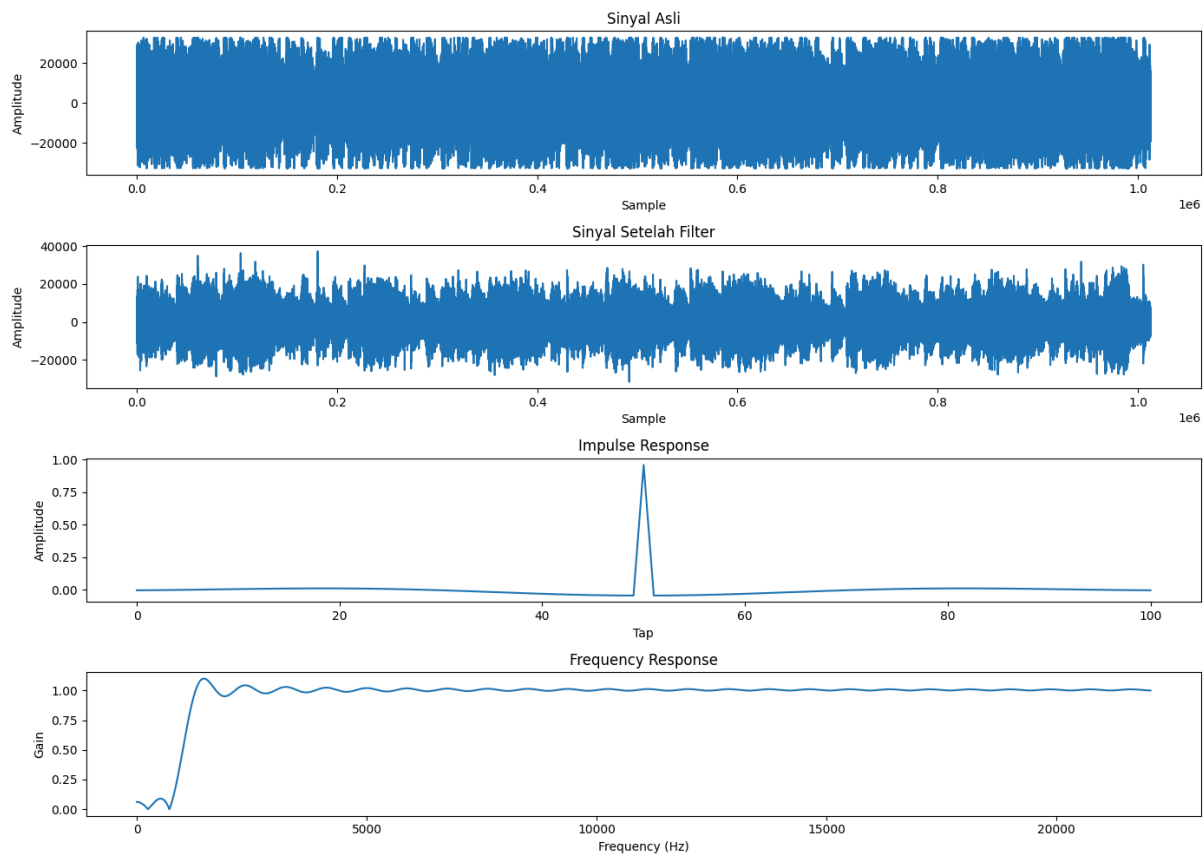


- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo acak dengan berbagai frekuensi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter menunjukkan frekuensi yang dipotong dengan respons fase yang sangat linier.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan penurunan eksponensial yang sangat halus dengan sedikit atau tanpa osilasi, mencerminkan respons fase linier.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang *gradual* dengan minim *ripple*, memberikan transisi frekuensi yang sangat halus dan respons fase linier yang ideal.

C. High Pass Filter

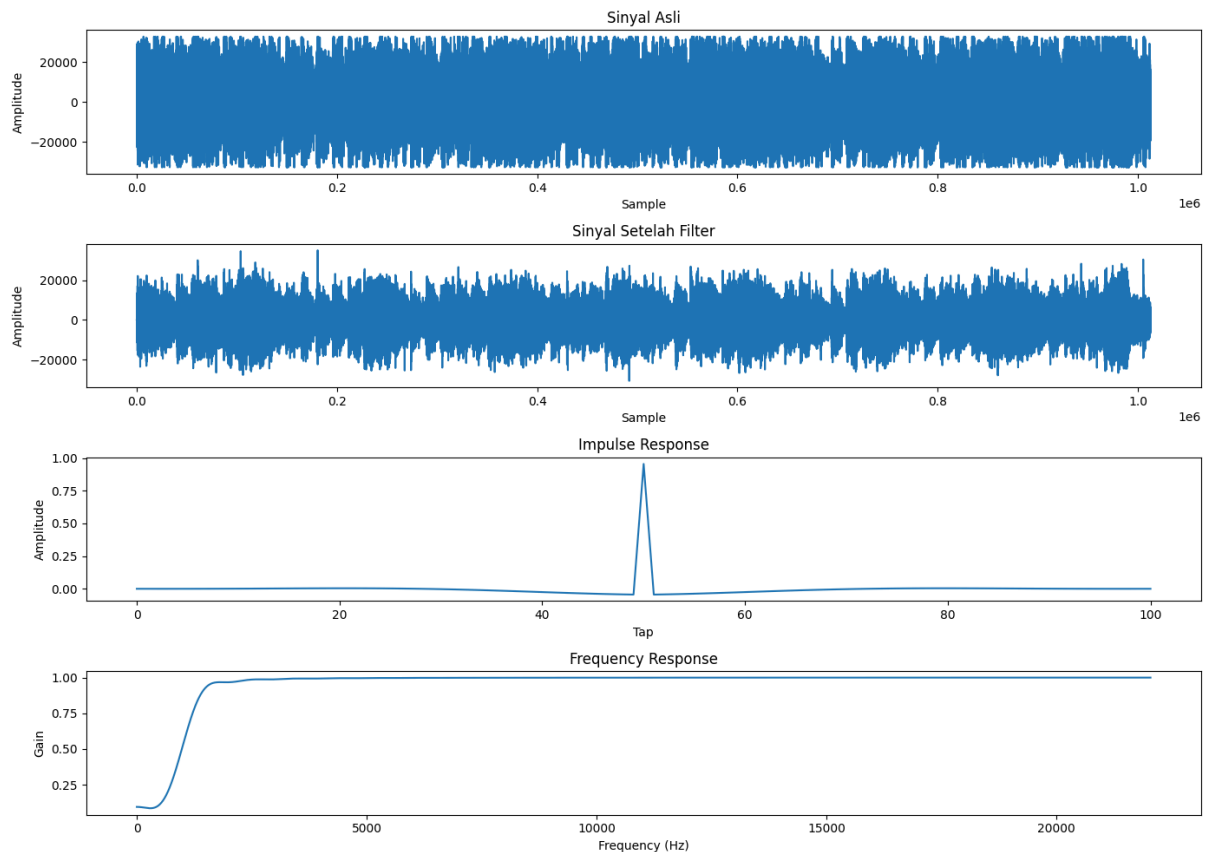
a. Finite Impulse Response (FIR)

1. Rectangular Window



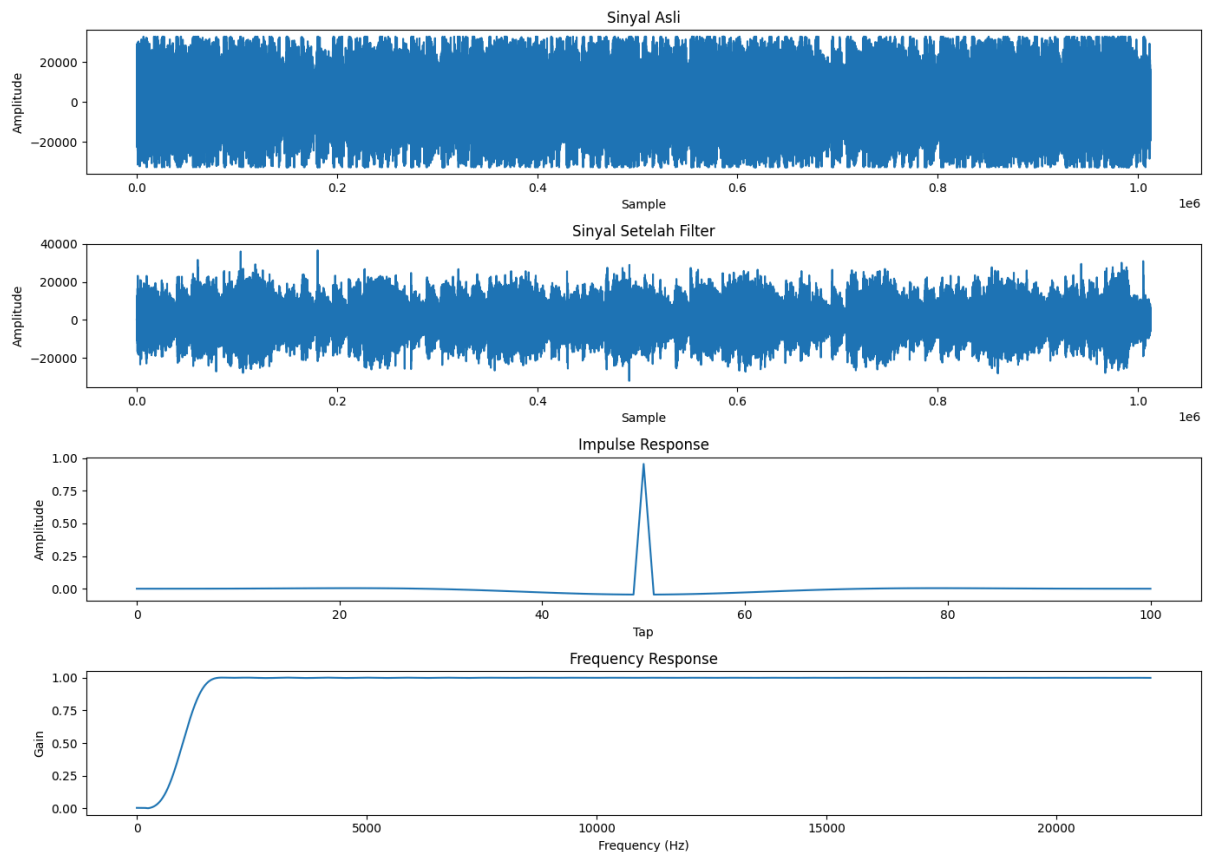
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan amplitudo yang bervariasi dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan, sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan komponen frekuensi rendah, sehingga hanya frekuensi tinggi yang dipertahankan.
- **Impulse Response**
Respons impuls berbentuk seperti deret konstan dengan panjang tertentu. Ini menunjukkan bahwa semua titik dalam jendela berkontribusi secara sama terhadap sinyal keluaran.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi dari filter ini menunjukkan lobe utama yang sempit dengan sidelobe yang tinggi. Hal ini menyebabkan *ripple* yang signifikan dalam *band-pass filter*, dengan pemotongan frekuensi rendah yang tajam.

2. *Triangular Window*



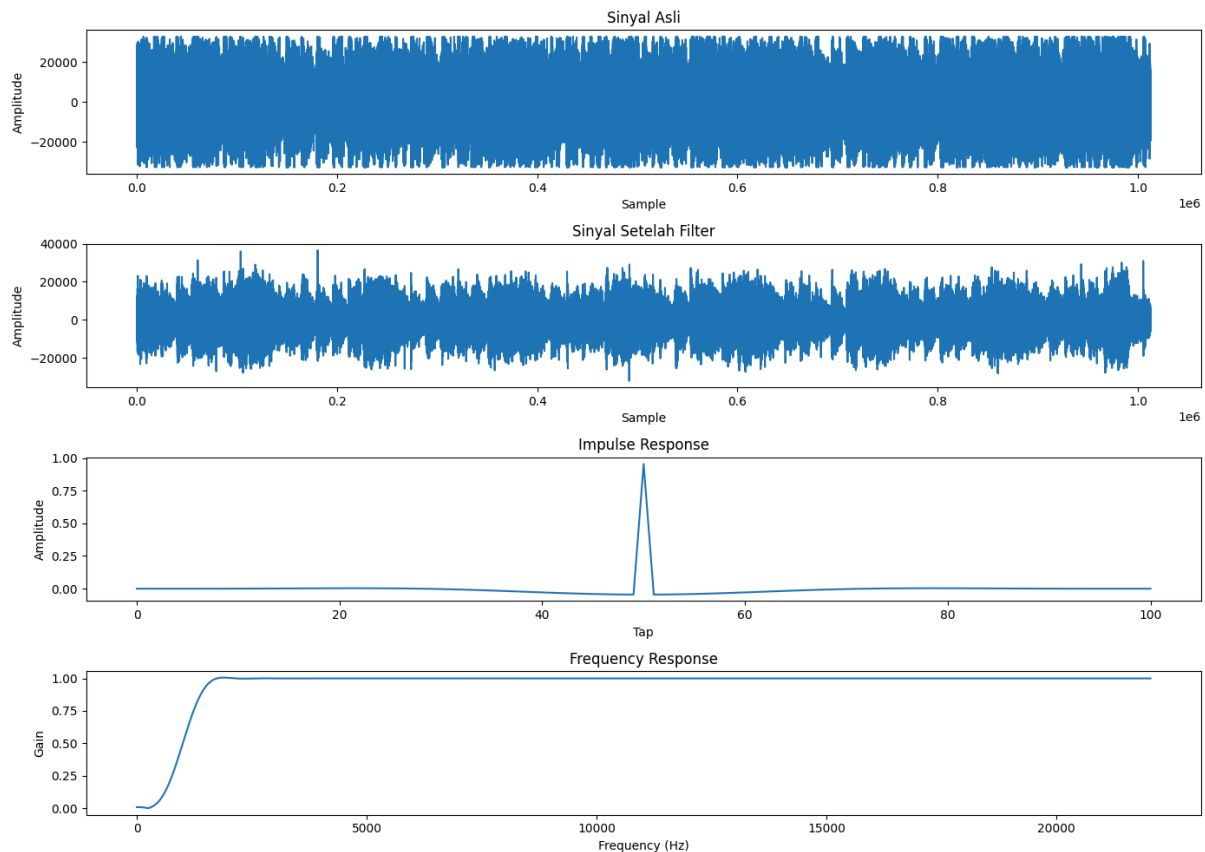
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan filter dengan jendela triangular, sinyal hasil filter lebih halus dengan pemotongan frekuensi rendah yang lebih baik.
- ***Impulse Response***
Respons impuls dari filter dengan jendela triangular menunjukkan bentuk segitiga simetris, di mana nilai amplitudo menurun secara linear dari tengah jendela.
- ***Frequency Response***
Respons frekuensi dari filter ini memiliki lobe utama yang lebih lebar, namun *sidelobe*-nya lebih rendah sehingga menghasilkan *ripple* yang lebih kecil dan pemotongan frekuensi rendah yang lebih *gradual*.

3. *Hamming Window*



- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan filter dengan jendela *Hamming*, sinyal hasil filter lebih halus dengan frekuensi tinggi yang lebih selektif.
- ***Impulse Response***
Respons impuls memiliki bentuk sinusoidal yang dipotong, yang memberikan transisi yang lebih halus di tepi jendela.
- ***Frequency Response***
Respons frekuensi dari filter ini menunjukkan *lobe* utama yang sempit dan *sidelobe* rendah yang memberikan *ripple* yang lebih sedikit dan pemotongan frekuensi rendah yang lebih baik

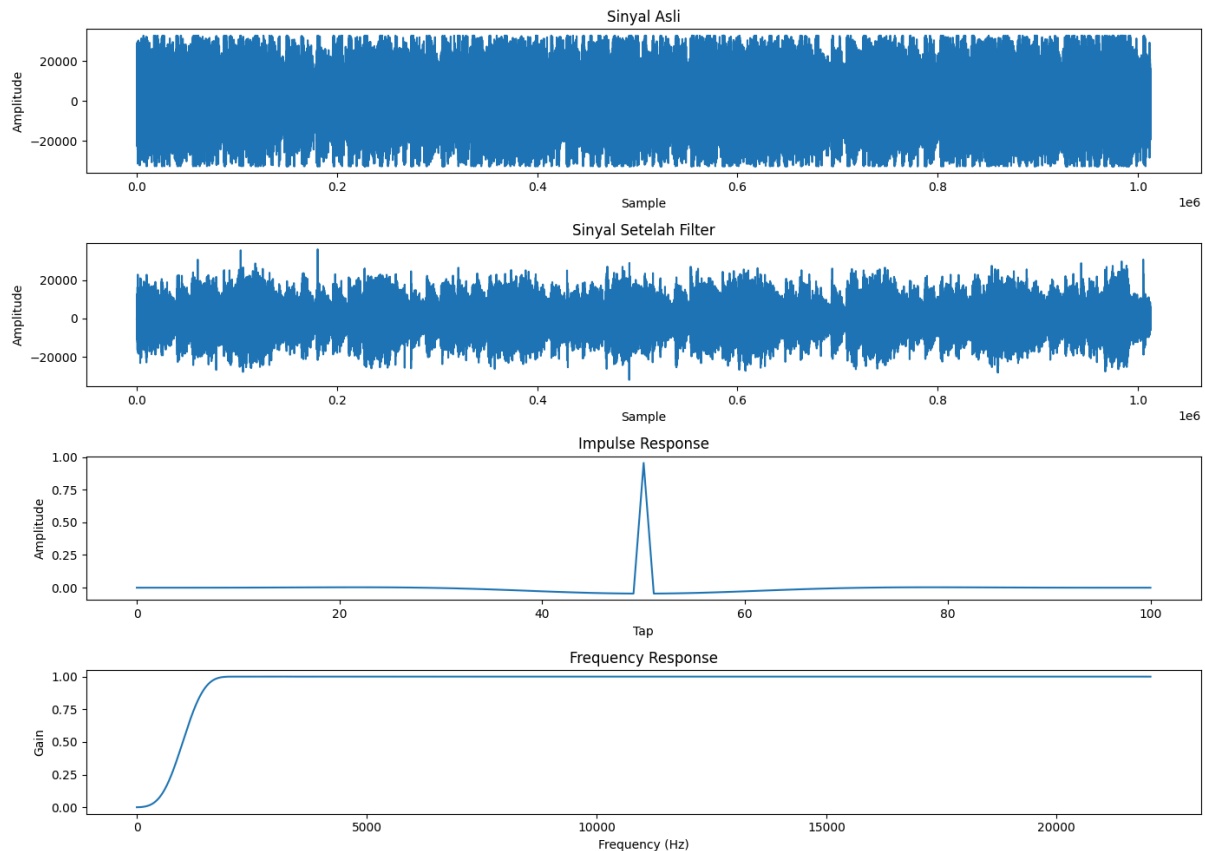
4. Hanning Window



- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan sinyal hasil filter sangat halus dengan frekuensi tinggi yang lebih terfokus.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan bentuk sinusoidal yang lebih halus dan memberikan transisi yang sangat mulus di tepi jendela.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi dari filter ini memiliki lobe utama yang sangat sempit dan *sidelobe* yang sangat rendah, memberikan performa yang baik dalam mengurangi *ripple* dan pemotongan frekuensi rendah yang optimal.

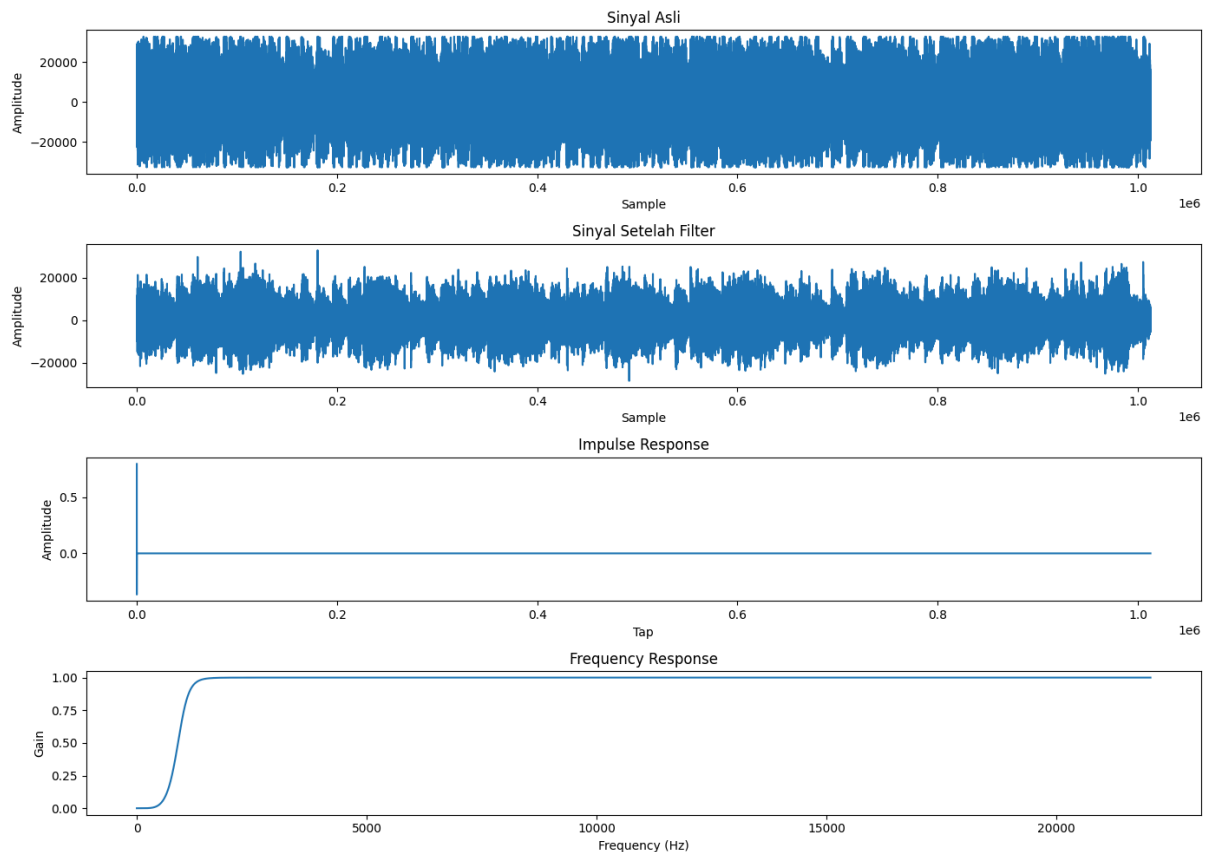
b. Infinite Impulse Response (IIR)

1. Chebyshev Window



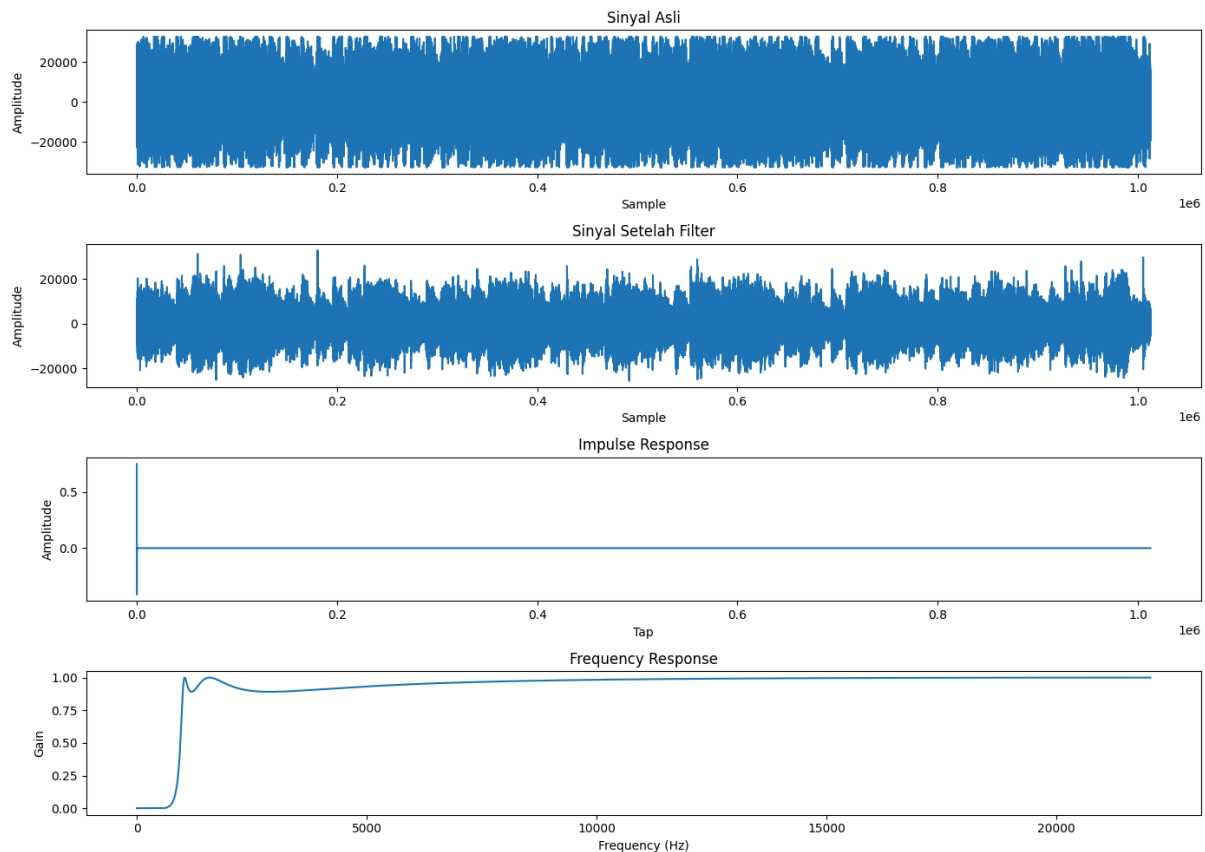
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi rendah dengan selektivitas tinggi namun dapat menampilkan *ripple* dalam *band pass*.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan penurunan eksponensial dengan osilasi dalam amplitudo, mencerminkan karakteristik *ripple* pada *band pass*.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang curam di sekitar tepi *band*-dengan *ripple* dalam *band pass* dan *stopband*, memberikan pemotongan frekuensi rendah yang sangat tajam.

2. Butterworth Window



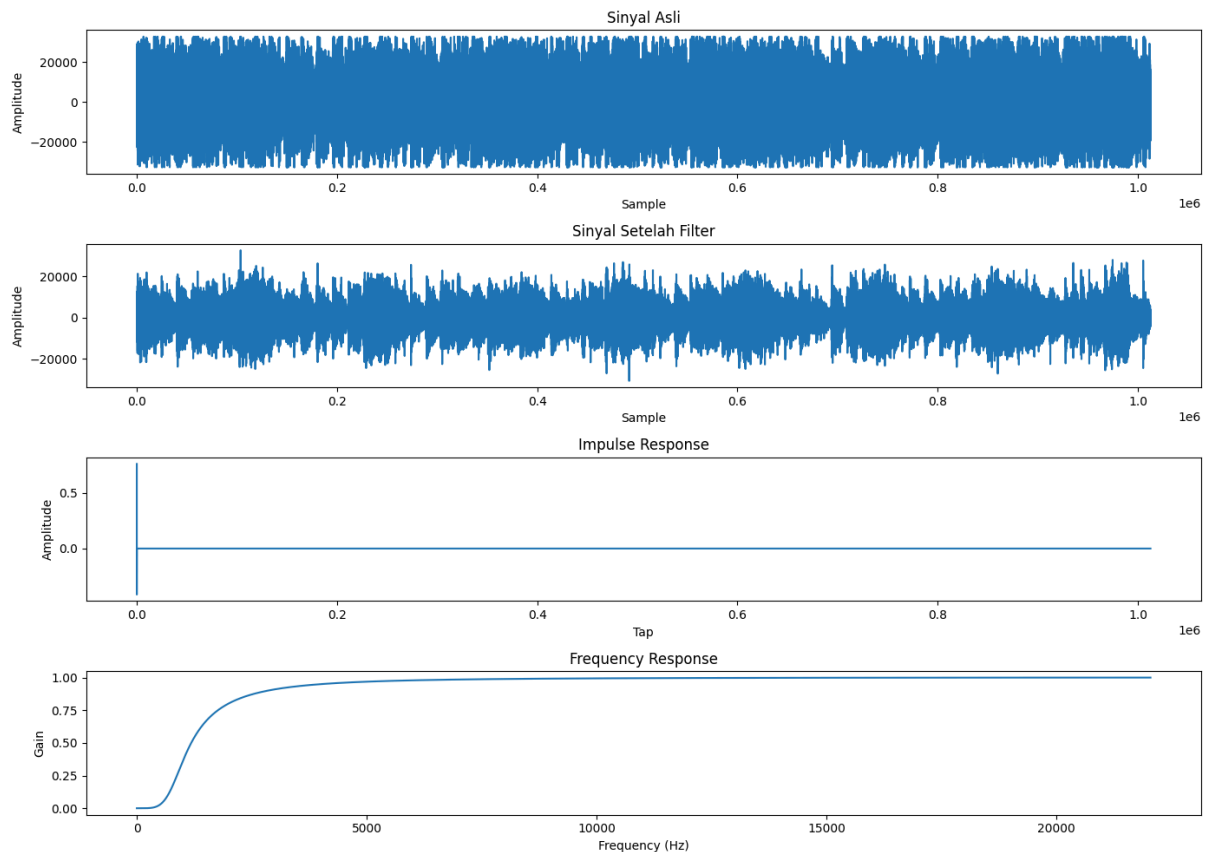
- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan sinyal hasil filter sangat halus dengan pemotongan frekuensi rendah yang *gradual*.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan penurunan eksponensial yang halus tanpa osilasi, menunjukkan transisi yang mulus.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang lebih *gradual*, tanpa ripple dalam *band pass* atau *stopband*, memberikan pemotongan frekuensi rendah yang halus.

3. *Elliptic Window*



- Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter
Sinyal asli menampilkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan filter *Elliptic*, sinyal hasil filter menunjukkan pemotongan frekuensi rendah yang sangat selektif dengan *ripple* di *band-pass* dan *stopband*.
- Impulse Response
Respons impuls dari filter *Elliptic* menunjukkan penurunan eksponensial dengan osilasi yang lebih signifikan dibandingkan Chebyshev, menunjukkan *ripple* yang lebih tinggi.
- Frequency Response
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang sangat curam dengan *ripple* yang signifikan di *band-pass* dan *stopband*, memberikan pemotongan frekuensi rendah yang sangat tajam.

4. Bessel Window



- **Sinyal Asli dan Sinyal Setelah Filter**
Sinyal asli menunjukkan variasi amplitudo dengan komponen frekuensi rendah dan tinggi. Setelah diterapkan sinyal hasil filter menunjukkan frekuensi rendah yang dipotong dengan respons fase yang sangat linier.
- **Impulse Response**
Respons impuls menunjukkan penurunan eksponensial yang sangat halus dengan sedikit atau tanpa osilasi, mencerminkan respons fase linier.
- **Frequency Response**
Respons frekuensi menunjukkan *roll-off* yang gradual dengan minim *ripple*, memberikan transisi frekuensi rendah yang sangat halus dan respons fase linier yang ideal.

KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa penerapan filter digital pada sinyal audio memiliki dampak signifikan dalam meningkatkan kualitas audio dengan mengurangi *noise* dan memperjelas sinyal. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi penerapan filter FIR (*Finite Impulse Response*) dan IIR (*Infinite Impulse Response*) dengan berbagai variasi *window* seperti *Rectangle*, *Triangular*, *Hamming*, *Hanning*, *Chebyshev*, *Butterworth*, *Elliptic*, dan *Bessel*. Filter FIR dirancang untuk memiliki fase linear yang memastikan bentuk gelombang tidak mengalami distorsi, sedangkan filter IIR menggunakan rekursi atau umpan balik untuk mengatur stabilitas sistem dan cocok untuk aplikasi yang membutuhkan respons frekuensi yang sangat akurat. Fungsi *window* digunakan dalam metode *windowing* untuk mendapatkan respon frekuensi ideal dari filter dan menghitung respon impulsnya. Setiap fungsi *window* memiliki karakteristik yang unik dalam domain waktu dan frekuensi, termasuk redaman lobus samping dan lebar transisi yang berbeda-beda.

Analisis menunjukkan bahwa filter FIR dengan *window* seperti *Hamming* dan *Hanning* memberikan hasil yang halus dan mengurangi *ripple* secara signifikan. Sementara itu, filter IIR seperti *Butterworth* dan *Bessel* menunjukkan respon frekuensi yang lebih *gradual* dengan pemotongan frekuensi tinggi yang lebih halus. Variasi jenis filter (*Low-Pass*, *Band-Pass*, dan *High-Pass*) juga memberikan hasil yang berbeda tergantung pada jenis frekuensi yang diinginkan untuk diloloskan atau diredam. Studi kasus pada berbagai genre musik menunjukkan bahwa penggunaan filter digital yang tepat dapat secara efektif meningkatkan kejernihan dan mengurangi *noise* tanpa mengorbankan keaslian suara asli. Oleh karena itu, pengolahan sinyal digital dengan penerapan filter yang tepat dapat secara substansial meningkatkan kualitas audio dalam produksi musik. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengembangkan filter adaptif yang dapat menyesuaikan diri dengan karakteristik sinyal input secara dinamis untuk hasil yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Liu, S. H., Sabrina, N. H., & Hardson, H. (2023). Comparison of FIR and IIR Filters for Audio Signal Noise Reduction. *Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer*, 15(1), 19-24.
2. Laksmi, N. C., Setyanto, A., & Wibowo, F. W. (2020). Kajian Pustaka Terstruktur Mengenai Analisis Audio Menggunakan Filterisasi Dengan Python. *Jurnal Informa: Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 6(2), 16-22.
3. Caroline, C., Shabrina, N. H., Ao, M. R., Laurencia, N., & Lee, V. (2020). Analisis Aplikasi Filter FIR dan Filter IIR dalam Pra-pemrosesan Sinyal Elektroensefalografi. *Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer*, 12(1), 40-48.
4. Roy, S., & Chandra, A. (2021). A survey of fir filter design techniques: low-complexity, narrow transition-band and variable bandwidth. *Integration*, 77, 193-204.
5. Hidayat, R., Liklikwatil, Y., & Adani, F. (2021). DESAIN RESONATOR REKURSIF IIR SEBAGAI PEMBANGKIT GELOMBANG. *Jurnal Online Sekolah Tinggi Teknologi Mandala*, 16(1), 23-27.
6. Maulydia, B., Zakaria, M. N., & Waluyo, W. (2020). Implementasi Metode Windowing Rectangular, Hamming, Hann, dan Kaiser pada Filter Finite Impulse Response (FIR) menggunakan Raspberry Pi. *Journal of Telecommunication Network (Jurnal Jaringan Telekomunikasi)*, 10(2), 96-101.
7. Pant, A., & Kumar, A. (2024). Hanning FIR window filtering analysis for EEG signals. *Biomedical Analysis*, 1(2), 111-123.
8. Bastian, A., Zaliluddin, D., & Al Maroghi, M. S. (2022). Implementasi Pemrograman Paralel Menggunakan Platform OpenMP pada Citra Digital dengan Metode Low-Pass Filter dan Histogram Equalization. *INFOTECH journal*, 8(1), 28-33.
9. Pujianiki, N. N., Parwata, I. N. S., & Osawa, T. (2021). A New Simple Procedure for Extracting Coastline from SAR Image Based on Low Pass Filter and Edge Detection Algorithm. *Lontar Komputer: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 12, 175.
10. Santosa, S. P., & Nasution, P. (2021). RANCANG BANGUN DAN ANALISIS KINERJA BAND PASS FILTER UNTUK PERANGKAT RADIO KOMUNIKASI 420–430 MHz. *JURNAL ELEKTRO*, 9(2), 82-97.
11. Fuada, S., Alisrobia, G., Hasanah, M., Yustina, M. C., & Rahmawati, D. (2023). Penggunaan Virtual lab. Circuit Wizard Untuk Simulasi Rangkaian High Pass Filter Pasif. *Jurnal Ilmiah Teknologi Infomasi Terapan (JITTER)*, 9(2).
12. Romolo, D., Widasari, E. R., & Prasetyo, B. H. (2022). Analisis Perbandingan Filter Finite Impulse Response, Infinite Impulse Response, dan Discrete Wavelet Transform pada Kondisi Kelelahan Mental berbasis Sinyal Electroencephalography. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 6(9), 4580-4585.
13. Kannan, P., Maheswari, S., Pon Bharathi, A., & Wilson, A. J. (2021). Spectral and performance measures analysis of ECG signal using various transforms and different types of iir and fir filters with different orders. *International Journal of Electrical Engineering and Technology (IJEET)*, 12(5), 96-108.
14. Ado, A. M., Vaswani, J., & Zubair, M. I. (2021). Design, simulation and response analysis of FIR filter designed by windowing technique. *Int. Research J. of Engineering and Technology*, 9(9), 1037-1044.

15. Basuki, A., Widyastuti, D. S., & Driyo, C. (2021). Implementasi Low Pass Filter Pada Pembatas Bidang Komunikasi Suara Untuk Meningkatkan Kapasitas Kanal Komunikasi. *KURVATEK*, 6(2), 237-246.
16. Sari, D. E., Warsito, T., & Harianto, B. B. (2021). ANALISA RANCANGAN SECARA TEORI BAND PASS FILTER PADA FREKUENSI CENTER 118.5 MHZ MENGGUNAKAN SOFTWARE ADVANCE DESIGN SYSTEM (ADS) DAN MATLAB. In *Prosiding SNITP (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan)* (Vol. 5).
17. Setiawan, F. B., & Kariman, P. (2023, December). Optimasi simulasi HPF dan LPF orde dua upaya penguatan sinyal digital. In *Proceedings of the National Conference on Electrical Engineering, Informatics, Industrial Technology, and Creative Media* (Vol. 3, No. 1, pp. 140-149).
18. Tun, P. T. Z., & Swe, K. T. (2020). AUDIO SIGNAL FILTERING WITH LOW-PASS AND HIGH-PASS FILTERS. *International Journal Of All Research Writings*, 2(12), 1-4.