

SIMULASI FILTER DIGITAL FIR MENGGUNAKAN METODE *WINDOWING* UNTUK MENGHILANGKAN *NOISE* PADA SINYAL AUDIO

Muhammad Farhan Ali¹, Nasri², Raisah Hayati³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe
Email: mhdfhrnl96@gmail.com¹, nasrint7@gmail.com², rai@pnl.ac.id³

Abstrak - Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan filter digital *Finite Impulse Response* (FIR) menggunakan metode *windowing* untuk menghilangkan *noise* pada sinyal suara. Filter FIR dipilih karena kemampuannya dalam memberikan stabilitas dan linearitas fase yang penting dalam pemrosesan sinyal digital. Beberapa metode *windowing* digunakan untuk merancang filter dengan karakteristik berbeda dalam hal peredaman *noise* dan respon frekuensi. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB untuk menguji efektivitas masing-masing metode *windowing* dalam mengurangi *noise* pada sinyal suara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Window Kaiser* memberikan hasil terbaik pada *noise* 0,25 dBW dengan menghasilkan nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) sebesar 26,6632 dB. Pada level *noise* 0,5 dBW *Window Kaiser* menunjukkan performa terbaik dengan menghasilkan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) sebesar 13,4842 dB. Dilevel *noise* 0,75 dBW menunjukan jika metode *Window Kaiser* menghasilkan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) tertinggi sebesar 5,9239. Pada penelitian ini *Window Rectangular* mendapatkan hasil paling rendah dari ke-3 level *noise*. Dengan menggunakan filter FIR berbasis *windowing*, peningkatan kualitas audio dalam berbagai aplikasi seperti telekomunikasi dan multimedia telah terbukti. Filter FIR mampu menghilangkan *noise* tanpa mengorbankan komponen sinyal yang diinginkan, yang penting untuk aplikasi komunikasi yang memerlukan kejelasan audio yang tinggi.

Kata Kunci : *Filter FIR, Windowing, Noise, SNR, Sinyal audio.*

Abstract – This study aims to simulate a digital *Finite Impulse Response* (FIR) filter using the *windowing* method to eliminate *noise* in speech signals. The FIR filter was chosen because of its ability to provide stability and phase linearity which are important in digital signal processing. Several *windowing* methods are used to design filters with different characteristics in terms of *noise* reduction and frequency response. Simulations were performed using MATLAB to test the effectiveness of each *windowing* method in reducing *noise* in speech signals. The results showed that the *Kaiser Window* gave the best results at 0.25 dBW *noise* by producing a *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) value of 26.6632 dB. At a *noise* level of 0.5 dBW, the *Kaiser Window* showed the best performance by producing a *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) of 13.4842 dB. At a *noise* level of 0.75 dBW, the *Kaiser Window* method produced the highest *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) of 5.9239. In this study, the *Rectangular Window* got the lowest results of the 3 *noise* levels. By using *windowing*-based FIR filters, audio quality improvements in various applications such as telecommunications and multimedia have been proven. FIR filters are able to remove *noise* without sacrificing desired signal components, which is important for communication applications that require high audio clarity.

Keywords: *FIR filter, Windowing, Noise, SNR, Audio signal.*

I. PENDAHULUAN

Dalam era digital saat ini, kebutuhan akan kualitas audio yang jernih dan bebas dari gangguan semakin meningkat, terutama dalam aplikasi seperti komunikasi, rekaman musik, dan produksi konten multimedia. Namun, sinyal audio sering kali terganggu oleh *noise*, yang dapat berasal dari berbagai sumber seperti interferensi elektromagnetik, getaran mekanis, atau lingkungan rekaman yang tidak ideal. *Noise* ini dapat merusak kualitas suara dan mengurangi efektivitas penyampaian informasi. Oleh karena itu, penghilangan *noise* menjadi salah satu tantangan utama dalam pengolahan sinyal audio [1].

Dalam dunia teknologi informasi dan komunikasi, kejernihan sinyal audio merupakan aspek penting yang

mempengaruhi kualitas komunikasi. *Noise* atau gangguan yang sering terjadi pada sinyal audio dapat mengurangi kejelasan dan kualitas informasi yang disampaikan. Oleh karena itu, penggunaan filter digital, khususnya *Filter Respon Impuls Finite* (FIR), menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi masalah ini.

Metode *windowing* dalam desain filter FIR digunakan untuk mengontrol karakteristik frekuensi dari filter dengan cara memodifikasi koefisien filter. Metode ini memungkinkan penyesuaian filter agar dapat lebih efisien dalam menghilangkan *noise* tanpa mengganggu komponen sinyal yang diinginkan [2].

Simulasi filter digital FIR menggunakan metode *windowing* menjadi penting untuk menunjukkan bagaimana filter dapat dirancang dan

diimplementasikan untuk mengoptimalkan penghilangan *noise* pada sinyal audio. Dengan simulasi, kita dapat memvisualisasikan dan menganalisis performa filter sebelum diterapkan pada sistem nyata, sehingga dapat menghemat waktu dan biaya dalam proses pengembangan sistem komunikasi audio yang lebih baik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi filter digital yang lebih efisien dan efektif untuk aplikasi di berbagai bidang, seperti telekomunikasi, pengolahan sinyal audio, dan sistem pendengaran bantu.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sinyal Audio

Sinyal audio adalah salah satu bentuk sinyal informasi yang kualitasnya dapat dipengaruhi derau (*noise*). Sinyal audio adalah representasi digital atau analog dari gelombang suara yang terjadi di alam. Sinyal audio dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu sinyal audio analog dan sinyal audio digital. Sinyal audio analog adalah sinyal yang kontinu dalam domain waktu, merupakan representasi langsung dari gelombang suara. Contohnya adalah suara yang direkam dari mikrofon atau suara yang dihasilkan oleh speaker. Di sisi lain, sinyal audio digital adalah sinyal yang diskret dalam domain waktu, merupakan representasi numerik dari sinyal audio analog yang dihasilkan melalui proses digitalisasi menggunakan sampling dan kuantisasi. Contohnya adalah file audio digital seperti MP3, WAV, atau FLAC [1].

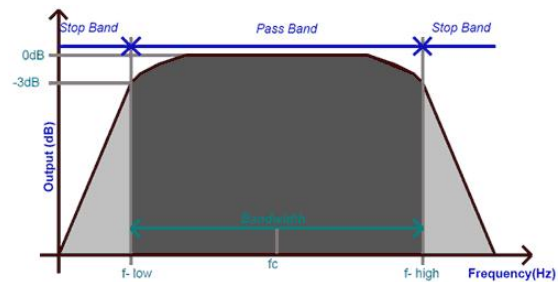
B. Filter Digital Finite Impulse Response (FIR)

Filter digital FIR (*Finite Impulse Response*) adalah salah satu jenis filter digital yang memiliki karakteristik respon impuls terbatas. Filter ini dirancang untuk memproses sinyal digital dengan cara mengkonvolusi sinyal input dengan koefisien filter yang telah ditentukan sebelumnya. Keunggulan utama filter FIR adalah stabilitas yang terjamin karena tidak memiliki umpan balik, serta kemampuannya untuk mencapai fase linier yang sempurna. Proses filtering FIR melibatkan operasi penjumlahan dan perkalian antara sampel input dan koefisien filter, yang menghasilkan output sebagai kombinasi linear dari input saat ini dan sebelumnya. Desain filter FIR dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti metode jendela (*window method*), sampling frekuensi, dan optimasi. Filter FIR banyak digunakan dalam berbagai aplikasi pemrosesan sinyal digital, termasuk penghilangan *noise*, pembentukan spektrum, dan equalisasi saluran, karena fleksibilitas dan kinerja yang dapat diprediksi [3].

C. Bandpass Filter

BPF adalah jenis filter yang hanya melewatkan sinyal pada rentang frekuensi tertentu dan meredam sinyal diluar rentang frekuensi tersebut. BPF memiliki dua

frekuensi *cut off* yaitu frekuensi *cut off* bawah (f_L) dan frekuensi *cut off* atas (f_H). Rentang kedua frekuensi *cut off* inilah yang dilewatkan oleh filter sedangkan sinyal diluar rentang frekuensi tersebut akan diredam [4].



Gbr. 1 Bandpass Filter

D. Metode Windowing

Metode windowing adalah teknik fundamental dalam pemrosesan sinyal digital yang digunakan untuk meminimalkan efek kebocoran spektrum saat melakukan analisis frekuensi pada sinyal yang tidak terputus atau bersifat tak terbatas. Bila dimisalkan $w(n)$ adalah fungsi *window* dan $h_d(n)$ adalah respon impuls dari filter ideal, maka respon impuls dari filter yang sebenarnya (aktual) dapat dirumuskan pada Persamaan berikut [5]:

$$w(n) = h_d(n)w(n) \quad (1)$$

Ada beberapa fungsi *window* yang tersedia. Masing- masing memiliki karakteristik yang berbeda dalam *domain* waktu dan *domain* frekuensi, yaitu :

a. Rectangular Window

$$w(n) = 1, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (2)$$

b. Hamming Window

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right), 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3)$$

c. Hanning Window

$$w(n) = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), 0 \leq n \leq N - 1 \quad (4)$$

d. Barlet Window

$$w(n) = \frac{2}{N-1} \left(\frac{N-1}{2} - \left| n - \frac{N-1}{2} \right| \right) \quad (5)$$

e. Blackman Window

$$w(n) = 0,42 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) + 0,08 \cos \left(\frac{4\pi n}{N-1} \right), 0 \leq n \leq N - 1 \quad (6)$$

f. Kaiser Window

$$w(n) = \frac{I_0 \left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1} \right)^2} \right)}{I_0(\beta)}, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (7)$$

g. Dolph-Chebyshev Window

$$w(n) = \cosh \left(\frac{N-1}{2} \cosh^{-1} \left(\frac{r \cos \left(\frac{\pi n}{N-1} \right)}{\cosh \left(\cosh^{-1}(r) \right)} \right) \right) \quad (8)$$

E. SNR (Signal to Noise Ratio)

Sinyal yang mengalami gangguan mengalami penurunan kualitasnya. Kualitas sinyal ini dapat ditentukan nilai dari nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang diukur dalam satuan decibel (dB). Secara matematis, *Signal to Noise Ratio* (SNR) dinyatakan dalam satuan desibel (dB) [6].

$$SNR = 10 \text{ Log}_{10} \frac{\text{Daya Sinyal}}{\text{Daya Noise}} \text{ dB} \tag{9}$$

III. METODOLOGI

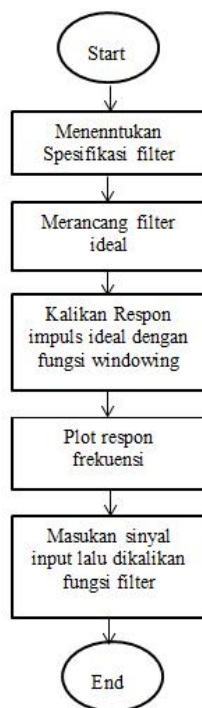
A. Konsep Desain

Penelitian ini menggunakan software Matlab untuk merancang Filter digital FIR dengan metode *windowing*. Tahapan penelitian yang dilakukan adalah:

1. Melakukan observasi mengenai materi teori digital FIR.
2. Pengambilan data diambil dengan cara mempengaruhi sinyal audio pada level noise yang berbeda, kemudian sinyal yang dipengaruhi noise difilter menggunakan digital FIR dengan metode masing-masing *window*.
3. Hasil pengambilan data disesuaikan dengan parameter penelitian, yaitu *Signal to Noise Ratio* (SNR).
4. Analisis data untuk mengetahui efektivitas masing-masing metode *windowing* pada filter digital FIR.

B. Proses Perancangan Filter

Gambar 2 mengilustrasikan tahapan perancangan filter.



Gbr. 2 Flowchart

Proses perancangan filter FIR meliputi beberapa tahapan, dimulai dari penentuan spesifikasi filter, perancangan filter ideal, perkalian respon impuls ideal dengan fungsi *windowing*, hingga pemrosesan sinyal input dan plotting respon frekuensi. Analisis data dilakukan dengan membandingkan nilai SNR yang dihasilkan dari masing-masing teknik *windowing*, serta menampilkan grafik sinyal audio sebelum dan sesudah pemfilteran, dan grafik spektrum.

C. Metode Analisis

Pengambilan data dilakukan dengan menjalankan simulasi di MATLAB menggunakan sinyal audio berformat WAV sebagai masukan awal. Sinyal ini kemudian ditambahkan *noise* dengan level sebesar 0,25 dBW, 0,5 dBW, dan 0,75 dBW, sebelum diproses melalui filter digital FIR dengan metode *windowing*. Kinerja filter digital FIR dalam menghilangkan noise diukur menggunakan parameter SNR yang dihasilkan dari masing-masing teknik *windowing*.

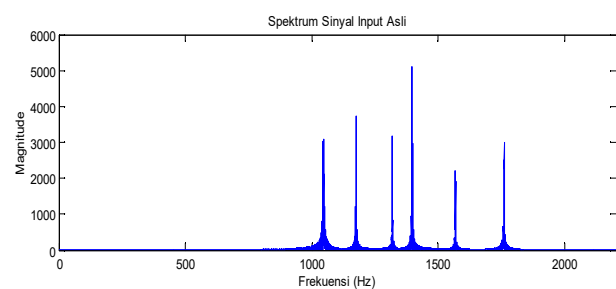
Pada tahap pengujian, parameter SNR digunakan untuk menganalisis efektivitas pengurangan *noise* pada sinyal audio. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik sinyal audio dan SNR dengan variasi level noise.

Untuk memudahkan pemahaman, data disajikan dalam bentuk tabel SNR, grafik spektrum, serta grafik sinyal audio sebelum dan sesudah dilakukan pemfilteran, sehingga memungkinkan analisis lebih lanjut terhadap nilai SNR pada masing-masing teknik *windowing*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sinyal Input

Sinyal input dalam bentuk musik berformat WAV. Dengan memilih format WAV, peneliti dapat memastikan bahwa kualitas audio tetap terjaga selama proses pengolahan dan analisis, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan representatif terhadap sinyal aslinya. Gambar spektrum dapat dilihat pada Gambar 3.



Gbr. 3 Spektrum sinyal input

B. Spesifikasi Filter

Filter yang telah dirancang diterapkan pada sinyal yang telah diberi *noise*. Tabel 1 merupakan spesifikasi filter yang digunakan.

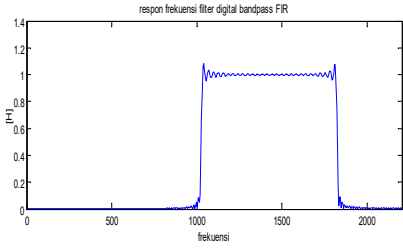
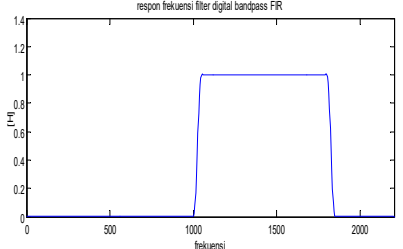
TABEL I
Spesifikasi Filter

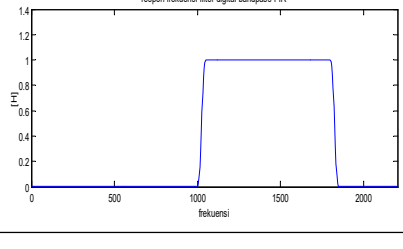
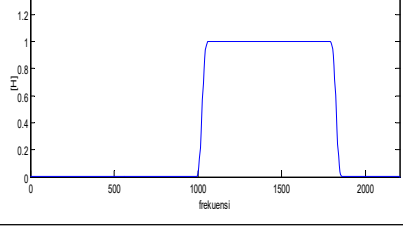
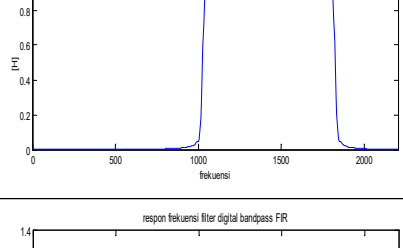
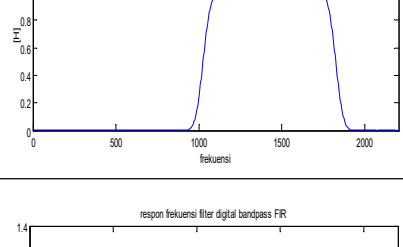
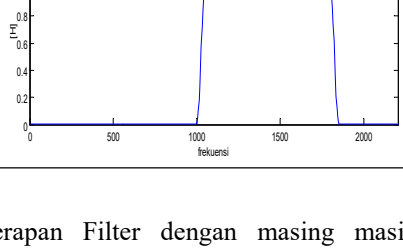
Parameter	Nilai	Keterangan
Frekuensi Passband Bawah (F_{p1})	1200 Hz	Frekuensi batas bawah di mana sinyal mulai dipertahankan.
Frekuensi Stopband Bawah (F_{s1})	850 Hz	Frekuensi batas bawah di mana sinyal mulai dihambat.
Frekuensi Passband Atas (F_{p2})	1750 Hz	Frekuensi batas atas di mana sinyal tetap dipertahankan.
Frekuensi Stopband Atas (F_{s2})	1900 Hz	Frekuensi batas atas di mana sinyal dihambat.
Lebar Transisi	Min(wp1-ws1, ws2-wp2)	Rentang frekuensi transisi antara passband dan stopband.
Panjang Filter (M)	Tergantung pada lebar transisi	Panjang filter yang dihitung untuk mencapai spesifikasi filter.
Windowing	Window Rectangulaar, Window Hamming, window Hanning, Window Barlet, window Blackman, Window Kaiser, Window Dolph-Chebyshev	Teknik untuk mengurangi efek samping dari filter ideal.

C. Respon Penerapan Filter Digital FIR dengan masing masing Metode Windowing

Setelah merancang filter, berikut adalah respon filter dari masing masing metode *Windowing*:

TABEL II
Respon Filter

Metode Windowing	Respon Filter
Window Rectangular	
Window Hanning	

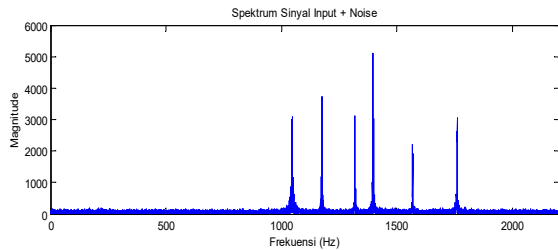
Metode Windowing	Respon Filter
Window Hamming	
Window Blackman	
Window Barlet	
Window Kaiser	
Window Dolph-Chebyshev	

D. Hasil Penerapan Filter dengan masing masing tingkatan Noise.

Hasil pemfilteran dari masing-masing tingkatan *noise* yang digunakan untuk mempengaruhi sinyal input disajikan dalam bagian ini. Analisis ini bertujuan untuk mendemonstrasikan efektivitas metode pemfilteran yang diterapkan pada berbagai kondisi gangguan. Setiap tingkatan *noise* memberikan gambaran tentang bagaimana kinerja filter digital FIR dengan konfigurasi bandpass berubah seiring dengan meningkatnya intensitas gangguan. Perbandingan hasil pemfilteran ini tidak hanya menunjukkan sejauh mana *noise* dapat

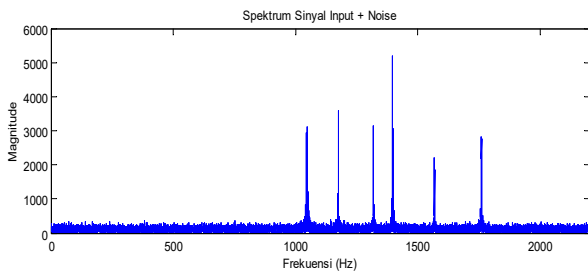
direduksi, tetapi juga memperlihatkan bagaimana karakteristik sinyal asli dipertahankan pada setiap skenario.

1. Hasil penerapan filter pada tingkat *noise* 0,25 dBW
Gambar 4 menyajikan spektrum frekuensi dari sinyal input yang telah terkontaminasi *noise* sebesar 0,25 dBW. Adanya *noise* ini menyebabkan distorsi pada spektrum sinyal asli.



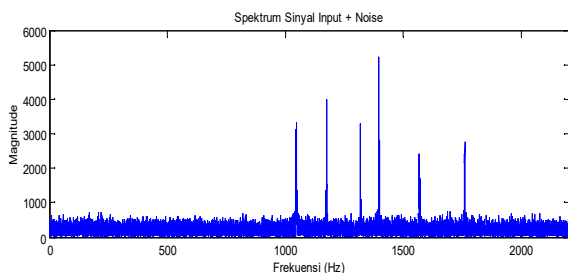
Gbr. 4 Spektrum sinyal input terpengaruh *noise* 0,25dBW

2. Hasil penerapan filter pada tingkat *noise* 0,5 dBW
Gambar 5 menyajikan spektrum frekuensi dari sinyal input yang telah terkontaminasi *noise* sebesar 0,5 dBW. Adanya *noise* ini menyebabkan distorsi pada spektrum sinyal asli.



Gbr. 5 Spektrum sinyal input terpengaruh *noise* 0,5dBW

3. Hasil penerapan filter pada tingkat *noise* 0,75 dBW
Gambar 6 menyajikan spektrum frekuensi dari sinyal input yang telah terkontaminasi *noise* sebesar 0,75 dBW. Adanya *noise* ini menyebabkan distorsi pada spektrum sinyal asli.



Gbr. 6 Spektrum sinyal input terpengaruh *noise* 0,75dBW

E. Hasil Pemfilteran

Setelah mengaplikasikan beragam metode *windowing* pada proses pemfilteran, diperoleh hasil pemfilteran dalam bentuk spectrum dari sinyal input yang sudah difilter .

1. Hasil pemfilteran untuk *noise* 0,25 dBW dapat dilihat pada Tabel 3.

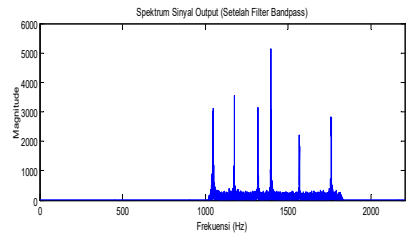
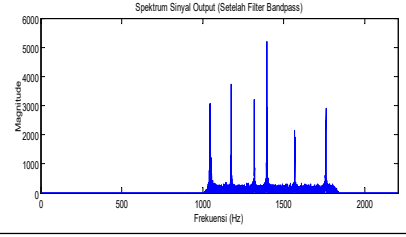
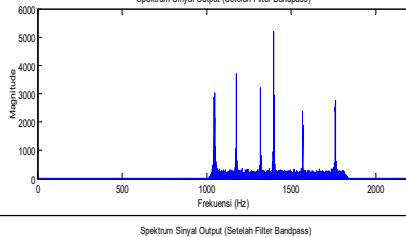
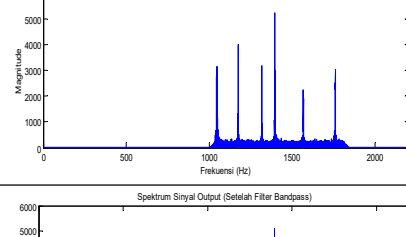
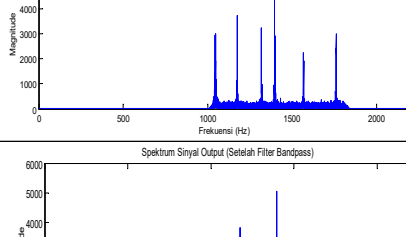
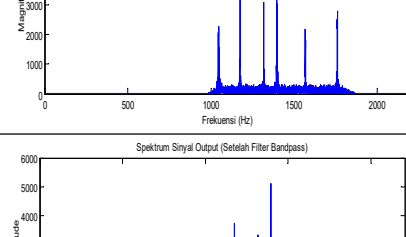
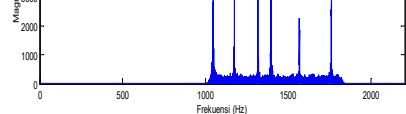
TABEL III
Respon Hasil pemfilteran untuk *noise* 0,25 dBW

Metode Windowing	Spektrum
<i>Window Rectangular</i>	
<i>Window Hanning</i>	
<i>Window Hamming</i>	
<i>Window Blackman</i>	
<i>Window Barlet</i>	
<i>Window Kaiser</i>	
<i>Window Dolph-Chebyshev</i>	

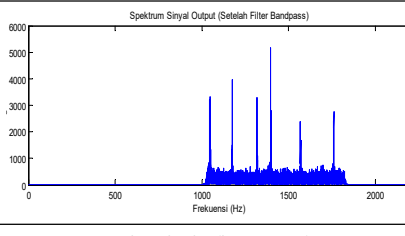
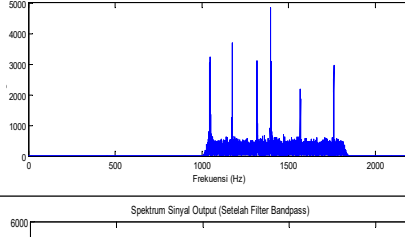
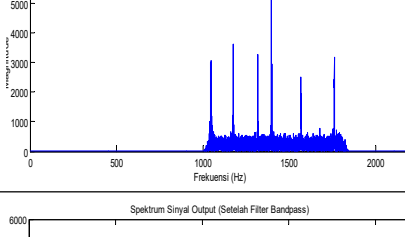
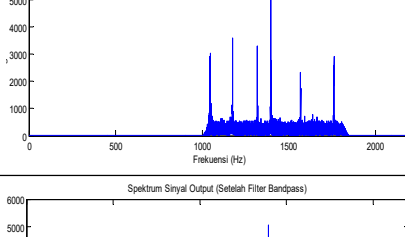
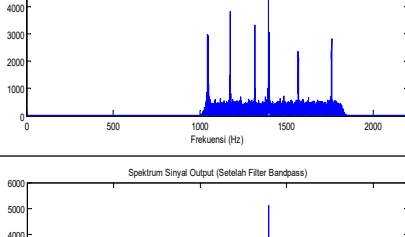
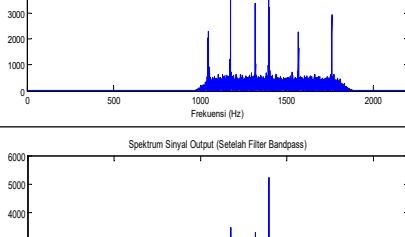
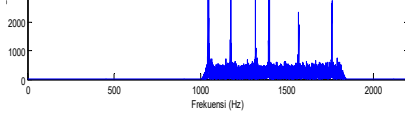
2. Hasil pemfilteran untuk *noise* 0,5 dBW dapat dilihat pada Tabel 4.

3. Hasil pemfilteran untuk *noise* 0,75 dBW dapat dilihat pada Tabel 5.

TABEL IV
Respon Hasil pemfilteran untuk *noise* 0,5 dBW

Metode Windowing	Spektrum
<i>Window Rectangular</i>	
<i>Window Hanning</i>	
<i>Window Hamming</i>	
<i>Window Blackman</i>	
<i>Window Barlet</i>	
<i>Window Kaiser</i>	
<i>Window Dolph-Chebyshev</i>	

TABEL V
Respon Hasil pemfilteran untuk *noise* 0,75 dBW

Metode Windowing	Spektrum
<i>Window Rectangular</i>	
<i>Window Hanning</i>	
<i>Window Hamming</i>	
<i>Window Blackman</i>	
<i>Window Barlet</i>	
<i>Window Kaiser</i>	
<i>Window Dolph-Chebyshev</i>	

F. Analisa Hasil

Setelah mengaplikasikan beragam metode *windowing* pada proses pemfilteran, diperoleh hasil perbandingan kinerja masing-masing metode dalam menangani berbagai jenis *noise*.

1. Data hasil pemfilteran dengan tingkat *noise* 0,25 dBW

Setelah melakukan pemfilteran dengan tingkat *noise* sebesar 0,25 dBW maka didapatkan data sebagai berikut :

TABEL VI
Data hasil pemfilteran dengan tingkat *noise* 0,25 dBW

No	Tipe Window	SNR Sesudah Filter
1	Rectangular	13,7647
2	Hanning	14,9851
3	Hamming	14,9286
4	Blackman	18,5167
5	Barlet	24,8926
6	Kaiser	26,6632
7	Dolph-Chebyshev	16,1755

Tabel VI menunjukkan hasil pemfilteran sinyal dengan *noise* 0,25 dBW menggunakan berbagai tipe *window*. *Window Kaiser* memberikan hasil terbaik, meningkatkan SNR dari 9,0803 dB menjadi 26,6632 dB. *Window Barlet* di posisi kedua dengan SNR 24,8926 dB. Metode lain juga efektif, kecuali *Window Rectangular* yang menunjukkan performa terendah dengan SNR 13,7647 dB setelah pemfilteran.

2. Data hasil pemfilteran dengan tingkat *noise* 0,5 dBW

Setelah melakukan pemfilteran dengan tingkat *noise* sebesar 0,5 dBW maka didapatkan data sebagai berikut:

TABEL VII
Data hasil pemfilteran dengan tingkat *noise* 0,5 dBW

No	Tipe Window	SNR Sesudah Filter
1	Rectangular	7,5849
2	Hanning	7,8912
3	Hamming	7,8779
4	Blackman	8,4079
5	Barlet	9,2528
6	Kaiser	13,4842
7	Dolph-Chebyshev	8,1055

Tabel VII menunjukkan hasil pemfilteran sinyal dengan *noise* 0.5 dBW menggunakan berbagai tipe *window*. *Window Kaiser* memberikan hasil terbaik, meningkatkan SNR dari 3,0405 dB menjadi 13,4842 dB. *Window Barlet* di posisi kedua dengan SNR 9,2528 dB. Metode lain juga efektif, kecuali *Window Rectangular* yang menunjukkan performa terendah dengan SNR 7,5849dB setelah pemfilteran.

3. Data hasil pemfilteran dengan tingkat *noise* 0,75 dBW

Setelah melakukan pemfilteran dengan tingkat *noise* sebesar 0,75W dB maka didapatkan data sebagai berikut :

TABEL VIII
Data hasil pemfilteran dengan tingkat *noise* 0,75 dBW

No	Tipe Window	SNR Sesudah Filter
1	Rectangular	4,0261
2	Hanning	4,1877
3	Hamming	4,1805
4	Blackman	4,4113
5	Barlet	4,7979
6	Kaiser	5,9239
7	Dolph-Chebyshev	4,2818

Tabel VIII menunjukkan hasil pemfilteran sinyal dengan *noise* 0.75 dBW menggunakan berbagai tipe *window*. *Window Kaiser* memberikan hasil terbaik, meningkatkan SNR dari 0,847 dB menjadi 5,9239 dB. *Window Barlet* di posisi kedua dengan SNR 4,7979 dB. Metode lain juga efektif, kecuali *Window Rectangular* yang menunjukkan performa terendah dengan SNR 4,0261 dB setelah pemfilteran.

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode *windowing* yang berbeda memiliki performa yang bervariasi dalam meredam *noise* pada sinyal audio. Metode *Kaiser Window* terbukti paling efektif, dengan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) tertinggi setelah pemfilteran. Hal ini menunjukkan bahwa *Kaiser Window* mampu mereduksi *noise* secara signifikan tanpa mengorbankan kualitas sinyal asli. Dari hasil pengujian pada berbagai tingkat *noise* (0,25 dBW, 0,5 dBW, dan 0,75 dBW), metode *windowing Rectangular* menunjukkan performa terburuk pada semua tingkat redaman *noise*.

REFERENSI

- [1] Leonard, C., & Shabrina, N. H. (2020). Analisis Keefektifan Penggunaan Filter FIR dan IIR pada Sinyal Pernapasan EMGdi dengan Simulasi MATLAB. *Ultima Computing: Jurnal Sistem Komputer*, 12(1), 29-34.
- [2] 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.
- [3] Febriana, I. (2021). Simulasi Akuisisi Sinyal Audio Dengan Menggunakan Matlab. *SinarFe7*, 4(1), 209-213.
- [4] Haq, A. D., Santoso, I., & Macrina, Z. A. A. (2012). Estimasi Signal to Noise Ratio (SNR)

- Menggunakan Metode Korelasi. *Transient*, 1(4), 1–8.
- [5] Setya, W., Putra, A. P., Ganjari, A. S., & Umar, F. A. (2017). Gelombang berdiri longitudinal.
- [6] Utama, A. G., Nabila, A. S., Azzahra, A. K., Fadlun, D., & Assaidah, A. (2023). Pembuatan graphical user interface (GUI) Matlab untuk demonstrasi metode windowing pada low pass filter (LPF) Finite Impulse Response (FIR). *Jurnal Penelitian Sains*, 25(1), 34-40.