

DESAIN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK FIR LOW-PASS FILTER BERBASIS BLACKMAN WINDOW UNTUK PEMROSESAN SINYAL SUARA DIGITAL

DESIGN AND CHARACTERISTIC ANALYSIS OF BLACKMAN WINDOW-BASED FIR LOW-PASS FILTER FOR DIGITAL SPEECH SIGNAL PROCESSING

Muhammad Zaki Abdulah*, Faishal Azhar Ramadhan, Ranu Abiyyu Ramadhani, Jordan Zefanya Purba, Reni Rahmadewi, Maria Bestarina Laili

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

*2210631160059@student.unsika.ac.id, 2210631160008@student.unsika.ac.id, 2210631160018@student.unsika.ac.id,

2210631160092@student.unsika.ac.id, reni.rahmadewi@ft.unsika.ac.id, maria.bestarina@ft.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 25 Mei 2026

Direvisi: 22 Juni 2026

Disetujui: 10 Juli 2026

Kata Kunci:

FIR Filter, Filter Low-Pass, Blackman Window, Sinyal Ucapan Digital, Pemrosesan Sinyal Digital

ABSTRAK

Pemrosesan sinyal digital memiliki peran penting dalam pengolahan sinyal suara, khususnya dalam memisahkan komponen suara utama dari derau frekuensi tinggi yang tidak diinginkan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis karakteristik *Finite Impulse Response Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window* pada sinyal suara digital. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi antara desain filter FIR berbasis *Blackman Window* dengan evaluasi numerik sinyal sebelum dan sesudah proses *filtering*. Filter dirancang dengan frekuensi sampling sebesar 48 kHz, frekuensi *cutoff* sebesar 6 kHz, *transition band* sebesar 2 kHz, dan orde filter sebesar 131. Analisis dilakukan terhadap respons magnitudo, respons fase, respons *impuls*, respons langkah, spektrum frekuensi, distribusi energi, frekuensi dominan, *noise level* estimasi, dan *Signal-to-Noise Ratio* estimasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa filter memiliki karakteristik *low-pass*, yaitu mampu mempertahankan komponen frekuensi rendah sekaligus meredam komponen frekuensi tinggi di atas frekuensi *cutoff*. Secara kuantitatif, energi frekuensi tinggi di atas 6 kHz menurun sebesar 99,94%, sedangkan SNR estimasi meningkat dari -1,80 dB menjadi 30,34 dB. Frekuensi dominan tetap berada pada 614,67 Hz, yang menunjukkan bahwa komponen utama suara tetap dipertahankan setelah *filtering*. Dengan demikian, FIR *Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window* dapat digunakan sebagai pendekatan dasar prapemrosesan sinyal suara digital untuk mereduksi derau frekuensi tinggi.

ABSTRACT

Digital signal processing plays an important role in speech signal processing, particularly in separating the main speech components from unwanted high-frequency noise. This study aims to design and analyze the characteristics of a Blackman Window-based Finite Impulse Response Low-Pass Filter for digital speech signal processing. The contribution of this study lies in integrating Blackman Window-based FIR filter design with numerical evaluation of speech signals before and after filtering. The filter was designed with a sampling frequency of 48 kHz, a cutoff frequency of 6 kHz, a transition band of 2 kHz, and a filter order of 131. The analysis included magnitude response, phase response, impulse response, step response, frequency spectrum, energy distribution, dominant frequency, estimated noise level, and estimated Signal-to-Noise Ratio. The results show that the designed filter has low-pass characteristics, allowing low-frequency components to pass while attenuating high-frequency components above the cutoff frequency. Quantitatively, the high-frequency energy above 6 kHz decreased by 99.94%, while the estimated SNR increased from -1.80 dB to 30.34 dB. In addition, the dominant frequency remained at 614.67 Hz, indicating that the main speech component was preserved after filtering. Therefore, the Blackman Window-based FIR Low-Pass Filter can be used as a basic preprocessing approach for reducing high-frequency noise in digital speech signals.

Keywords:

FIR Filter, Low-Pass Filter, Blackman Window, Digital Speech Signal; Digital Signal Processing

*Corresponding author: 2210631160059@student.unsika.ac.id

I. PENDAHULUAN

Pemrosesan sinyal digital memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi teknik, khususnya pada pengolahan audio, sistem komunikasi, instrumentasi, dan sistem kontrol [1]. Salah satu teknik fundamental dalam pemrosesan sinyal digital adalah proses penyaringan (*filtering*), yang digunakan untuk memisahkan komponen sinyal berdasarkan karakteristik frekuensinya [2]. Dalam pengolahan sinyal audio, komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan dapat mengganggu kejernihan sinyal asli dan menurunkan kualitas audio yang diproses [3].

Low-Pass Filter (LPF) merupakan salah satu jenis filter digital yang memungkinkan komponen frekuensi rendah untuk dilewatkan, sementara komponen frekuensi tinggi diredam [4]. Karakteristik ini membuat LPF sesuai untuk aplikasi pengolahan audio, khususnya ketika informasi utama dari sinyal berada pada rentang frekuensi rendah hingga menengah [5]. Pada sinyal suara, informasi penting umumnya terkonsentrasi pada daerah frekuensi rendah, sedangkan komponen frekuensi tinggi dapat mengandung derau atau gangguan yang tidak diinginkan [6][7].

Filter *Finite Impulse Response* (FIR) banyak digunakan dalam pemrosesan sinyal digital karena memiliki beberapa keunggulan, antara lain stabilitas yang melekat, struktur non-rekursif, serta kemampuan menghasilkan respons fase linear [8]. Respons fase linear penting dalam pengolahan sinyal suara dan audio karena dapat membantu mempertahankan bentuk gelombang serta mengurangi distorsi fase. Berbeda dengan filter rekursif, filter FIR tidak menggunakan umpan balik, sehingga respons impulsnya memiliki durasi terbatas dan implementasinya dapat dianalisis secara lebih sistematis [9]. Karakteristik tersebut menjadikan filter FIR sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan kestabilan dan pengendalian respons frekuensi yang akurat [10].

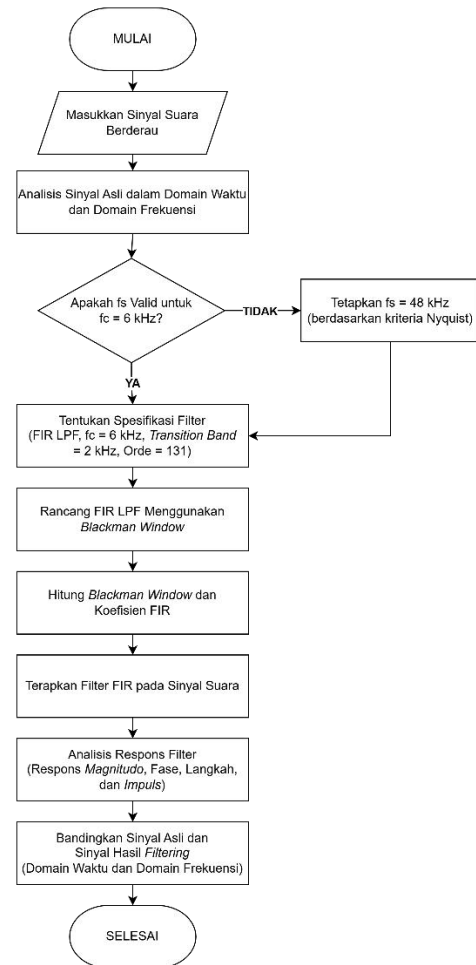
Dalam perancangan filter FIR, metode *windowing* umum digunakan untuk memperoleh respons impuls berdurasi terbatas yang praktis dari respons filter ideal [11]. Respons impuls ideal suatu filter memiliki panjang tak hingga, sehingga tidak dapat diimplementasikan secara langsung pada sistem nyata [12]. Oleh karena itu, fungsi jendela (*window function*) digunakan untuk memotong dan membentuk respons impuls tersebut [13]. Di antara beberapa fungsi jendela, *Blackman Window* dipilih dalam penelitian ini karena memiliki karakteristik peredaman *sidelobe* yang baik dan mampu mengurangi kebocoran spektral pada daerah stopband [14]. Karakteristik ini bermanfaat dalam merancang filter *low-pass* yang diharapkan dapat menekan komponen frekuensi tinggi secara lebih efektif [15].

Penelitian ini berfokus pada desain dan analisis karakteristik *Blackman Window-Based FIR Low-Pass Filter* untuk pengolahan sinyal suara digital. Filter dirancang menggunakan frekuensi sampling sebesar 48 kHz, frekuensi *cutoff* sebesar 6 kHz, *transition band* sebesar 2 kHz, dan orde filter sebesar 131. Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada analisis karakteristik filter, meliputi respons *magnitudo*, respons fase, respons *impuls*, respons langkah, serta perbandingan sinyal sebelum dan sesudah proses *filtering* dalam domain waktu dan domain

frekuensi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengamati bagaimana *FIR Low-Pass Filter* yang dirancang merepresentasikan karakteristik *low-pass* dan meredam komponen frekuensi tinggi pada sinyal suara digital.

II. METODE PENELITIAN

A. Flowchart Penelitian



Gambar 1. Flowchart Penelitian

B. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan desain analitis-simulatif untuk mengembangkan dan menganalisis *Low-Pass Filter* digital berbasis metode *Finite Impulse Response* dengan menggunakan *Blackman Window*. Penelitian ini berfokus pada perancangan filter FIR yang stabil dengan karakteristik fase linear, serta pengamatan respons filter ketika diterapkan pada sinyal suara digital yang mengandung derau. Struktur FIR dipilih karena memiliki stabilitas yang melekat, mendukung respons fase linear, dan memungkinkan pengendalian karakteristik frekuensi secara presisi, yang penting dalam pengolahan sinyal suara. Tahapan penelitian meliputi analisis sinyal masukan, perancangan spesifikasi filter, perhitungan *Blackman Window*, pembentukan koefisien FIR, proses *filtering*, dan evaluasi sinyal keluaran. Analisis dilakukan dengan mengamati sinyal sebelum dan sesudah proses *filtering* dalam domain waktu dan domain frekuensi, serta

dengan meninjau respons *magnitudo*, respons fase, respons langkah, dan respons *impuls* dari filter yang dirancang.

C. Sinyal Masukan

Sinyal masukan yang digunakan dalam penelitian ini adalah rekaman sinyal suara digital yang mengandung komponen derau. Sinyal tersebut digunakan sebagai objek analisis untuk mengamati pengaruh derau frekuensi tinggi serta respons dari FIR *Low-Pass Filter* yang dirancang. Sebelum proses *filtering* dilakukan, sinyal dianalisis dalam domain waktu untuk mengamati variasi *amplitudo* terhadap waktu dan dalam domain frekuensi untuk mengidentifikasi distribusi komponen frekuensi. Analisis domain waktu digunakan untuk meninjau pola gelombang, fluktuasi *amplitudo*, dan kemungkinan gangguan derau, sedangkan analisis domain frekuensi digunakan untuk mengamati spektrum daya dan mengidentifikasi komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan. Analisis awal ini diperlukan untuk menentukan spesifikasi filter yang sesuai, khususnya frekuensi *cutoff* dan *transition band*, sebelum menerapkan FIR *Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window*.

Untuk memperkuat analisis visual, penelitian ini juga melakukan evaluasi numerik terhadap sinyal suara sebelum dan sesudah proses *filtering*. Sinyal suara yang memiliki dua kanal terlebih dahulu diubah menjadi sinyal mono dengan merata-ratakan kanal kiri dan kanal kanan. Selanjutnya, sinyal dianalisis menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk memperoleh distribusi energi pada domain frekuensi. Karena filter yang dirancang merupakan *Low-Pass Filter* dengan frekuensi *cutoff* sebesar 6 kHz, maka energi sinyal dipisahkan menjadi dua bagian, yaitu energi pada frekuensi ≤ 6 kHz sebagai komponen utama suara dan energi pada frekuensi > 6 kHz sebagai komponen frekuensi tinggi atau derau estimasi. Parameter numerik yang dihitung meliputi RMS amplitudo, energi total relatif, energi pada frekuensi ≤ 6 kHz, energi pada frekuensi > 6 kHz, persentase energi, frekuensi dominan, *noise level* estimasi, dan SNR estimasi.

MS amplitudo dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n]^2} \quad (1)$$

Energi total relatif pada domain frekuensi dihitung berdasarkan hasil FFT sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$E_{total} = \sum_{k=1}^N \frac{|X[k]|^2}{N^2} \quad (2)$$

Energi frekuensi rendah dan energi frekuensi tinggi dihitung dengan memisahkan komponen frekuensi berdasarkan frekuensi *cutoff* 6 kHz, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3) dan Persamaan (4).

$$E_{low} = \sum_{|fk| \leq 6000} \frac{|X[k]|^2}{N^2} \quad (3)$$

$$E_{high} = \sum_{|fk| > 6000} \frac{|X[k]|^2}{N^2} \quad (4)$$

Persentase energi dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$Persentase\ Energi = \frac{E_{bagian}}{E_{total}} \times 100\% \quad (5)$$

Noise level estimasi dihitung dari energi frekuensi tinggi dan dinyatakan dalam dBFS, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (6).

$$Noise\ Level = 20 \log_{10}(\sqrt{E_{high}}) \quad (6)$$

SNR estimasi dihitung berdasarkan perbandingan energi komponen utama suara terhadap energi frekuensi tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (7).

$$SNR_{estimasi} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_{low}}{E_{high}} \right) \quad (7)$$

Penggunaan istilah SNR estimasi dilakukan karena penelitian ini tidak menggunakan sinyal referensi bersih atau clean reference. Oleh karena itu, komponen frekuensi tinggi di atas 6 kHz digunakan sebagai pendekatan terhadap derau yang ingin direduksi oleh filter.

D. Spesifikasi Desain Filter

Tabel 1. Spesifikasi Desain Filter

NO	Parameter	Value
1	Filter Type	Low-Pass Filter
2	Filter Structure	FIR
3	Window Method	Blackman Window
4	Sampling Frequency	48 kHz
5	Cutoff Frequency	6 kHz
6	Transition Band	2 kHz
7	Stopband Attenuation	>70 dB
8	Passband Ripple	<0.1
9	Filter Order	131

E. Desain Filter FIR Berbasis Window Blackman

Perancangan filter FIR berbasis *Blackman Window* dalam penelitian ini dilakukan melalui tiga perhitungan utama, yaitu perhitungan orde filter, perhitungan koefisien *Blackman Window*, dan perhitungan koefisien akhir FIR. Orde filter (N) untuk *Blackman Window* diestimasi menggunakan rumus empiris berdasarkan lebar transisi. Lebar transisi dihitung sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (8).

$$\Delta f = \frac{2}{48} = 0.0417,$$

$$N + 1 \approx \frac{5.5}{\Delta f} = \frac{5.5}{0.0417} \approx 132 \Rightarrow N = 131 \quad (8)$$

Dengan demikian, orde filter yang dipilih adalah (N = 131). Orde filter ini digunakan untuk memenuhi batasan atenuasi *stopband* dan lebar transisi.

Setelah orde filter ditentukan, koefisien *Blackman Window* kemudian dihitung. *Blackman Window* digunakan untuk memperoleh respons frekuensi yang diinginkan dengan kebocoran *stopband* yang minimal karena memiliki karakteristik atenuasi *side-lobe* yang sangat baik, umumnya lebih dari 70 dB. Rumus umum *Blackman Window* dinyatakan pada Persamaan (9).

$$w[n] = 0.42 - 0.50\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right), n = 0, 1, \dots, N \quad (9)$$

Orde filter didefinisikan sebagai $M=131$, sehingga diperoleh panjang total filter sebesar $N=M+1=132$ sampel. Koefisien *Blackman Window* bersifat simetris terhadap titik tengah pada ($n = 66$). Beberapa contoh perhitungan ($w[n]$) ditunjukkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} [0] &= 0.42 - 0.50\cos\left(\frac{2\pi \cdot 0}{131}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi \cdot 0}{131}\right) \\ &= 0.42 - 0.50(1) + 0.08(1) = \boxed{0.000000}, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w[1] &= 0.42 - 0.50\cos\left(\frac{2\pi \cdot 1}{131}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi \cdot 1}{131}\right) \\ &\approx 0.42 - 0.50(0.997) + 0.08(0.988) \approx \boxed{0.000207}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w[2] &= 0.42 - 0.50\cos\left(\frac{2\pi \cdot 2}{131}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi \cdot 2}{131}\right) \\ &\approx 0.42 - 0.50(0.988) + 0.08(0.952) \approx \boxed{0.000831}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w[66] &= 0.42 - 0.50\cos\left(\frac{2\pi \cdot 66}{131}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi \cdot 66}{131}\right) \\ &= 0.42 - 0.50(-1) + 0.08(1) = 0.42 + 0.50 + 0.08 = \boxed{1.000000}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$w[131] = w[0] = \boxed{0.000000}$$

Berdasarkan sifat simetri tersebut, dapat dilihat bahwa *Blackman Window* memenuhi Persamaan (15).

$$[n] = w[N - n], \text{ for all } n \quad (15)$$

Koefisien *window* kemudian dikalikan secara titik demi titik dengan respons *impuls* ideal ($h_D[n]$) untuk menghasilkan koefisien akhir filter FIR ($h[n]$), sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (16).

$$h[n] = h_D[n] \cdot w[n] \quad (16)$$

Respons *impuls* ideal dari filter FIR *low-pass* dinyatakan pada Persamaan (17).

$$h_D[n] = \begin{cases} 2f_{c'}, & n = \frac{N}{2} \\ 2f_{c'} \cdot \frac{\sin[\omega_c(n - N/2)]}{\omega_c(n - N/2)}, & n \neq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (17)$$

dengan:

$$f_{c'} = \frac{6000}{48000} = 0.125, \quad \omega_c = 2\pi f_{c'} = \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

Beberapa contoh evaluasi koefisien akhir FIR ditunjukkan sebagai berikut.

$$h[0] = h_D[0] \cdot w[0] = 0.004490 \cdot 0.000000 = \boxed{0.000000} \quad (19)$$

$$h[1] = h_D[1] \cdot w[1] = 0.001889 \cdot 0.000207 = \boxed{0.000000} \quad (20)$$

$$h[2] = h_D[2] \cdot w[2] = -0.001918 \cdot 0.000831 = \boxed{-0.000002} \quad (21)$$

$$h[3] = h_D[3] \cdot w[3] = -0.004705 \cdot 0.001877 = \boxed{-0.000009} \quad (22)$$

$$h[4] = h_D[4] \cdot w[4] = -0.004782 \cdot 0.003356 = \boxed{-0.000016} \quad (23)$$

$$h[32] = h_D[32] \cdot w[32] = 0.008779 \cdot 0.322225 = \boxed{0.002829} \quad (24)$$

$$h[33] = h_D[33] \cdot w[33] = 0.003748 \cdot 0.346018 = \boxed{0.001297} \quad (25)$$

$$h[64] = h_D[64] \cdot w[64] = 0.196053 \cdot 0.997880 = \boxed{0.195638} \quad (26)$$

$$h[65] = h_D[65] \cdot w[65] = 0.243624 \cdot 0.999764 = \boxed{0.243566} \quad (27)$$

$$h[66] = h_D[66] \cdot w[66] = 0.243624 \cdot 0.999764 = \boxed{0.243566} \quad (28)$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, koefisien akhir filter FIR diperoleh dari hasil perkalian antara respons *impuls* ideal dan koefisien *Blackman Window*. Nilai yang dihitung menunjukkan bahwa koefisien meningkat menuju bagian tengah filter dan membentuk pola simetris, sebagaimana ditunjukkan oleh sifat simetri *Blackman Window*.

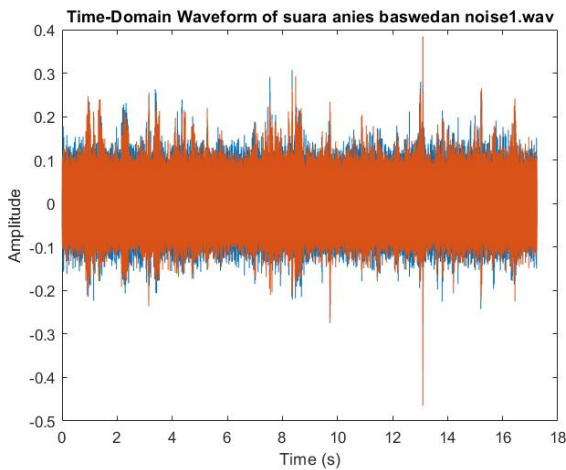
Tabel 2. Nilai Terpilih $h_D[n]$, $w[n]$, dan $h[n]$ untuk Filter FIR yang Dirancang

n	$h_D[n]$	$w[n]$	$h[n]$
0	0.004490	0.000000	0.000000
1	0.001889	0.000207	0.000000
63	0.117632	0.994120	0.116940
64	0.196053	0.997880	0.195638
65	0.243624	0.999764	0.243566
66	0.243624	0.999764	0.243566
130	0.001889	0.000207	0.000000
131	0.004490	0.000000	0.000000

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Sinyal Suara Asli

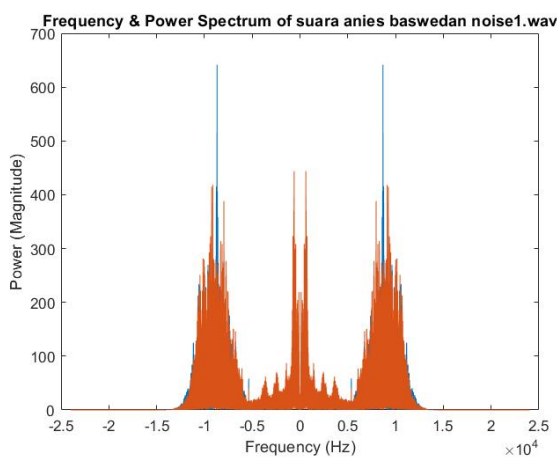
Sinyal masukan asli yang digunakan dalam penelitian ini adalah sinyal suara digital yang mengandung komponen derau. Sinyal tersebut dianalisis dalam domain waktu dan domain frekuensi untuk mengidentifikasi karakteristik umumnya sebelum proses *filtering* dilakukan. Bentuk gelombang sinyal asli dalam domain waktu ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk Gelombang Domain Waktu dari Sinyal Suara Asli Berderau

Berdasarkan Gambar 2, sinyal suara asli menunjukkan fluktuasi *amplitudo* yang rapat dan tidak beraturan sepanjang durasi rekaman. *Amplitudo* berubah secara dinamis karena karakteristik alami suara, seperti intonasi, tekanan vokal, dan jeda. Namun, bentuk gelombang juga menunjukkan fluktuasi kecil yang berlangsung secara kontinu serta beberapa puncak tajam, yang mengindikasikan adanya komponen derau yang tidak diinginkan dan bercampur dengan sinyal suara utama. Karakteristik ini menunjukkan bahwa sinyal mengandung informasi suara yang bermanfaat sekaligus gangguan yang dapat menurunkan kejernihan audio.

Representasi sinyal asli dalam domain frekuensi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum Frekuensi dari Sinyal Suara Asli Berderau

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, sinyal asli mengandung komponen frekuensi yang tersebar pada rentang yang relatif lebar. Spektrum menunjukkan komponen dominan di sekitar daerah frekuensi rendah, yang secara umum merepresentasikan informasi utama dari suara manusia. Namun, komponen spektral tambahan juga terlihat pada daerah frekuensi tinggi. Komponen frekuensi tinggi tersebut dapat berkaitan dengan derau atau gangguan yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, diperlukan proses *low-pass filtering* untuk menekan komponen frekuensi

tinggi sekaligus mempertahankan informasi penting suara pada rentang frekuensi yang lebih rendah.

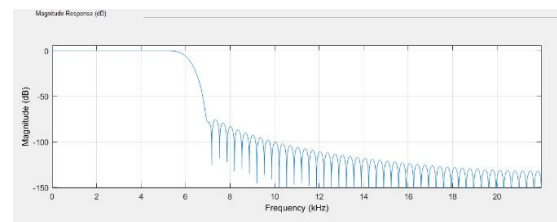
Selain dianalisis secara visual melalui domain waktu dan domain frekuensi, sinyal suara asli juga dianalisis secara numerik untuk memperoleh gambaran yang lebih objektif mengenai karakteristik awal sinyal. Berdasarkan hasil perhitungan, sinyal asli memiliki energi total relatif sebesar $1,0709 \times 10^{-3}$. Distribusi energi menunjukkan bahwa komponen pada frekuensi ≤ 6 kHz sebesar $4,2582 \times 10^{-4}$ atau 39,76% dari total energi, sedangkan komponen frekuensi > 6 kHz sebesar $6,4513 \times 10^{-4}$ atau 60,24% dari total energi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sinyal asli masih mengandung komponen frekuensi tinggi yang cukup besar dan berpotensi menjadi derau. Frekuensi dominan sinyal berada pada 614,67 Hz, yang merepresentasikan komponen utama suara. Selain itu, noise level estimasi pada frekuensi > 6 kHz sebesar -31,90 dBFS dengan nilai SNR estimasi awal sebesar -1,80 dB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sinyal masukan masih membutuhkan proses penyaringan untuk menekan komponen frekuensi tinggi tanpa menghilangkan komponen utama suara.

Tabel 3. Parameter Numerik Sinyal Suara Asli Berderau

Parameter	Nilai
Sampling frequency	48.000 Hz
Durasi sinyal	17,25 s
RMS amplitudo	0,03273
Energi total relatif	$1,0709 \times 10^{-3}$
Energi ≤ 6 kHz	$4,2582 \times 10^{-4}$
Persentase energi ≤ 6 kHz	39,76%
Energi > 6 kHz	$6,4513 \times 10^{-4}$
Persentase energi > 6 kHz	60,24%

B. Respons *Magnitudo* FIR Low-Pass Filter

FIR *low-pass filter* dirancang menggunakan metode *Blackman Window* dengan frekuensi *sampling* sebesar 48 kHz, frekuensi *cutoff* sebesar 6 kHz, *transition band* sebesar 2 kHz, dan orde filter sebesar 131. Respons *magnitudo* dari filter yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Respons *Magnitudo* FIR Low-Pass Filter Berbasis *Blackman Window*

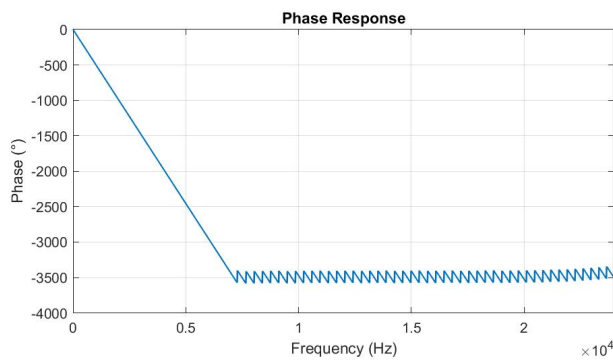
Gambar 4 menunjukkan bahwa filter yang dirancang memiliki karakteristik *low-pass* sesuai dengan yang diharapkan. Frekuensi di bawah frekuensi *cutoff* dilewatkan dengan atenuasi yang relatif kecil, sedangkan frekuensi di atas daerah *cutoff* mengalami atenuasi yang signifikan. Daerah passband menunjukkan bahwa filter mampu

mempertahankan komponen frekuensi rendah utama dari sinyal suara. Sementara itu, daerah stopband menunjukkan tingkat atenuasi yang besar, yang mengindikasikan kemampuan filter dalam menekan komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan.

Penggunaan *Blackman Window* berkontribusi terhadap penekanan *sidelobe* pada daerah *stopband*. Hal ini penting dalam perancangan filter FIR karena tingkat *sidelobe* yang lebih rendah dapat mengurangi kebocoran spektral dan meningkatkan selektivitas filter. Meskipun *Blackman Window* menghasilkan *transition band* yang lebih lebar dibandingkan beberapa fungsi *window* lainnya, metode ini memberikan atenuasi *stopband* yang lebih baik, sehingga sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan reduksi derau frekuensi tinggi dalam pengolahan sinyal suara.

C. Analisis Respons Fase

Respons fase dari FIR *low-pass filter* yang dirancang disajikan pada Gambar 5.



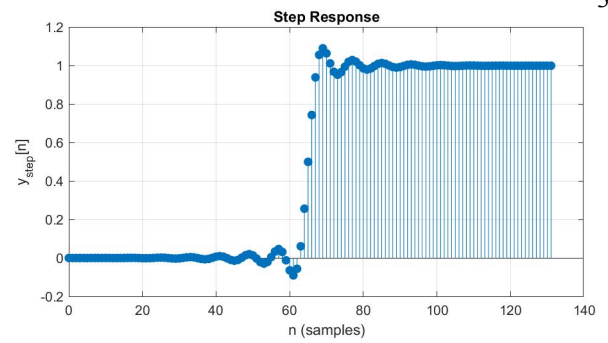
Gambar 5. Respons Fase FIR *Low-Pass Filter* Berbasis *Blackman Window*

Berdasarkan Gambar 5, respons fase menunjukkan pola yang relatif linear pada daerah *passband*. Karakteristik ini merupakan salah satu keunggulan utama filter FIR, terutama ketika dirancang dengan koefisien yang simetris. Respons fase linear berarti bahwa seluruh komponen frekuensi pada daerah *passband* mengalami *delay* yang seragam. Dalam pengolahan sinyal suara, karakteristik ini penting karena membantu mempertahankan bentuk gelombang asli dan mengurangi distorsi fase.

Setelah frekuensi *cutoff*, respons fase dapat menunjukkan variasi akibat atenuasi komponen frekuensi tinggi pada daerah *stopband*. Namun, karena *magnitudo* komponen tersebut telah mengalami penurunan yang signifikan, variasi fase pada daerah ini tidak terlalu memengaruhi informasi suara yang berguna. Oleh karena itu, filter yang dirancang dapat dianggap sesuai untuk aplikasi pengolahan sinyal suara yang membutuhkan pelestarian bentuk gelombang.

D. Analisis Respons Langkah dan Respons Impuls

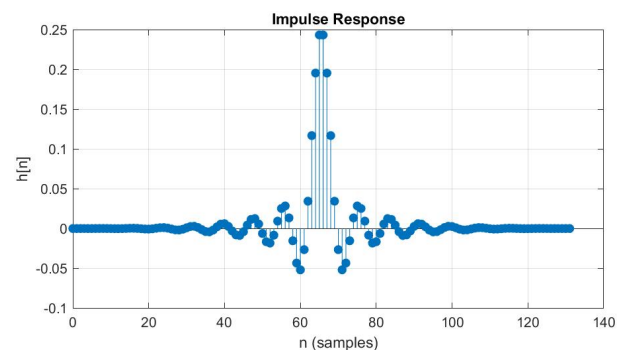
Respons langkah dari filter FIR yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Respons Langkah dari FIR *Low-Pass Filter* yang Dirancang

Respons langkah menunjukkan bagaimana keluaran filter berubah ketika masukan langkah diberikan. Berdasarkan Gambar 6, respons meningkat dan secara bertahap mencapai nilai keadaan tunak. Adanya respons transien pada awal kurva merupakan karakteristik normal dari filter FIR. Setelah beberapa sampel, respons menjadi stabil, yang menunjukkan bahwa filter mampu memproses sinyal masukan tanpa menghasilkan keluaran yang tidak stabil. Hasil ini mendukung karakteristik teoretis filter FIR, yaitu stabil secara inheren karena tidak menggunakan elemen umpan balik.

Respons impuls dari filter yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Respons Impuls dari FIR *Low-Pass Filter* yang Dirancang

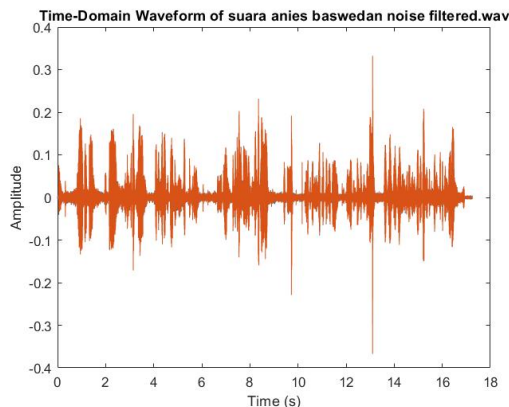
Gambar 7 menunjukkan bahwa respons impuls bersifat simetris terhadap sampel tengah. Simetri ini menunjukkan bahwa filter FIR memiliki karakteristik fase linear. Koefisien tertinggi berada di sekitar bagian tengah respons, sedangkan koefisien secara bertahap menurun menuju kedua ujungnya. Pola ini sesuai dengan fungsi *sinc* berjendela, yang umum ditemukan dalam perancangan FIR *low-pass filter* menggunakan metode *windowing*.

Respons impuls yang simetris juga mengonfirmasi bahwa koefisien filter telah dibentuk dengan tepat oleh *Blackman Window*. Karakteristik ini memungkinkan filter untuk melewati komponen frekuensi rendah sekaligus mereduksi komponen frekuensi tinggi. Dalam aplikasi pengolahan sinyal suara secara praktis, sifat ini penting karena memungkinkan atenuasi derau sambil tetap mempertahankan struktur bentuk gelombang suara asli.

E. Analisis Sinyal Suara Hasil Filtering

Setelah FIR *Low-Pass Filter* diterapkan pada sinyal suara asli yang berderau, sinyal hasil *filtering* dianalisis

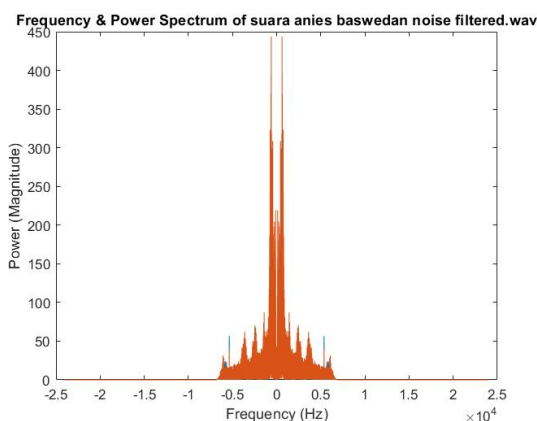
dalam domain waktu dan domain frekuensi. Bentuk gelombang domain waktu dari sinyal hasil *filtering* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Bentuk Gelombang Domain Waktu dari Sinyal Suara Hasil *Filtering*

Berdasarkan Gambar 8, sinyal hasil *filtering* menunjukkan perubahan amplitudo setelah proses penyaringan. Secara visual, fluktuasi amplitudo yang tajam tampak berkurang dibandingkan dengan sinyal asli. Namun, untuk memperkuat pengamatan tersebut, dilakukan analisis kuantitatif terhadap parameter sinyal sebelum dan sesudah *filtering*.

Spektrum frekuensi dari sinyal hasil *filtering* ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Spektrum Frekuensi dari Sinyal Suara Hasil *Filtering*

Berdasarkan Gambar 9, komponen frekuensi tinggi setelah proses *filtering* mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa filter bekerja sesuai karakteristik *low-pass*, yaitu mempertahankan komponen frekuensi rendah hingga menengah dan meredam komponen frekuensi tinggi di atas frekuensi *cutoff*.

Secara numerik, nilai RMS amplitudo menurun dari 0,03273 pada sinyal asli menjadi 0,02063 setelah *filtering*. Penurunan nilai RMS menunjukkan bahwa komponen amplitudo yang bersifat tajam dan tidak beraturan mengalami reduksi setelah proses penyaringan. Selain itu, energi total relatif menurun dari $1,0709 \times 10^{-3}$ menjadi $4,2553 \times 10^{-4}$. Penurunan ini terutama disebabkan oleh

berkurangnya komponen frekuensi tinggi pada sinyal hasil *filtering*.

Dalam domain frekuensi, energi pada frekuensi ≤ 6 kHz relatif tetap dipertahankan, yaitu dari $4,2582 \times 10^{-4}$

menjadi $4,2514 \times 10^{-4}$. Hal ini menunjukkan bahwa komponen utama suara pada rentang frekuensi rendah hingga menengah tidak mengalami perubahan yang besar setelah proses *filtering*. Sebaliknya, energi pada frekuensi > 6 kHz mengalami penurunan dari $6,4513 \times 10^{-4}$ menjadi $3,9294 \times 10^{-7}$, atau berkurang sebesar 99,94%. Persentase energi frekuensi tinggi juga menurun dari 60,24% menjadi 0,09%. Hasil ini menunjukkan bahwa FIR *Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window* mampu meredam komponen frekuensi tinggi secara signifikan.

Selain itu, frekuensi dominan sinyal tetap berada pada 614,67 Hz sebelum dan sesudah *filtering*. Kondisi ini menunjukkan bahwa komponen utama suara tetap dipertahankan setelah proses penyaringan. Noise level estimasi pada frekuensi > 6 kHz menurun dari -31,90 dBFS menjadi -64,06 dBFS, sedangkan nilai SNR estimasi meningkat dari -1,80 dB menjadi 30,34 dB. Dengan demikian, perubahan sinyal setelah *filtering* tidak hanya terlihat dari bentuk gelombang dan spektrum frekuensi, tetapi juga didukung oleh penurunan energi frekuensi tinggi, penurunan noise level estimasi, dan peningkatan nilai SNR estimasi.

Tabel 4. Perbandingan Parameter Sinyal Sebelum dan Sesudah *Filtering*

Parameter	Sinyal Asli Berderau	Sinyal Hasil <i>Filtering</i>
Sampling frequency	48.000 Hz	48.000 Hz
Durasi sinyal	17,25 s	17,25 s
RMS amplitudo	0,03273	0,02063
Energi total relatif	$1,0709 \times 10^{-3}$	$4,2553 \times 10^{-4}$
Energi ≤ 6 kHz	$4,2582 \times 10^{-4}$	$4,2514 \times 10^{-4}$
Energi > 6 kHz	$6,4513 \times 10^{-4}$	$3,9294 \times 10^{-7}$
Persentase energi ≤ 6 kHz	39,76%	99,91%
Persentase energi > 6 kHz	60,24%	0,09%
Frekuensi dominan	614,67 Hz	614,67 Hz
Noise level estimasi > 6 kHz	-31,90 dBFS	-64,06 dBFS
SNR estimasi	-1,80 dB	30,34 dB

Berdasarkan hasil tersebut, FIR *Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window* tidak hanya menunjukkan karakteristik *low-pass* secara teoretis melalui respons filter, tetapi juga memberikan perubahan terukur pada sinyal suara digital. Filter mampu menurunkan energi frekuensi tinggi secara signifikan, mempertahankan frekuensi

dominan suara, serta meningkatkan SNR estimasi setelah proses *filtering*. Oleh karena itu, filter yang dirancang dapat digunakan sebagai pendekatan dasar prapemrosesan sinyal suara digital untuk mereduksi komponen frekuensi tinggi yang tidak diinginkan.

IV. KESIMPULAN

FIR *Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window* yang dirancang dalam penelitian ini menunjukkan karakteristik yang sesuai untuk pengolahan sinyal suara digital, khususnya dalam meredam komponen frekuensi tinggi sekaligus mempertahankan informasi utama dari sinyal suara. Filter dirancang menggunakan frekuensi sampling sebesar 48.000 Hz, frekuensi *cutoff* sebesar 6.000 Hz, *transition band* sebesar 2.000 Hz, dan orde filter sebesar 131. Penggunaan frekuensi sampling 48.000 Hz memastikan bahwa frekuensi *cutoff* berada di bawah frekuensi *Nyquist* sebesar 24.000 Hz, sehingga desain filter dapat diterapkan pada sinyal suara digital yang digunakan.

Hasil analisis respons filter menunjukkan bahwa filter memiliki karakteristik *low-pass*. Respons magnitudo menunjukkan kemampuan filter dalam melewati komponen frekuensi rendah dan meredam komponen frekuensi tinggi di atas daerah *cutoff*. Respons fase yang relatif linear serta respons impuls yang simetris menunjukkan bahwa filter FIR yang dirancang memiliki karakteristik fase linear. Karakteristik ini penting dalam pengolahan sinyal suara karena dapat membantu mempertahankan bentuk gelombang dan mengurangi distorsi fase.

Hasil numerik menunjukkan bahwa proses filtering mampu menurunkan komponen frekuensi tinggi secara signifikan. Energi pada frekuensi > 6 kHz menurun dari $6,4513 \times 10^{-4}$ menjadi $3,9294 \times 10^{-7}$, atau berkurang sebesar 99,94%. Sementara itu, energi pada frekuensi ≤ 6 kHz relatif tetap dipertahankan, yaitu dari $4,2582 \times 10^{-4}$ menjadi $4,2514 \times 10^{-4}$. Frekuensi dominan sinyal juga tetap berada pada 614,67 Hz sebelum dan sesudah proses filtering, yang menunjukkan bahwa komponen utama suara tetap dipertahankan. Selain itu, noise level estimasi pada frekuensi > 6 kHz menurun dari -31,90 dBFS menjadi -64,06 dBFS, sedangkan SNR estimasi meningkat dari -1,80 dB menjadi 30,34 dB. Dengan demikian, FIR *Low-Pass Filter* berbasis *Blackman Window* dapat dipertimbangkan sebagai pendekatan dasar prapemrosesan sinyal suara digital untuk mereduksi derau frekuensi tinggi tanpa menghilangkan komponen utama suara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Reni Rahmadewi, S.T., M.T. selaku dosen pengampu yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan dalam pelaksanaan proyek pemrosesan sinyal digital ini. Saya juga berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan, pengolahan data, dan penyelesaian artikel ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] K. Hossain, R. Ahmed, M. Asadul Haque, and M. Towfiqur Rahman, "A Review of Digital FIR Filter Design in Communication Systems," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 10, no. 2, pp. 1380–1391, Feb. 2021, doi: 10.21275/sr21221133619.
- [2] S. Mugisha, M. Wassajja, G. M. Bamutiire, J. Bashabe, and M. Dahiru Buhari, "Review and analysis on digital filter design in digital signal processing," *KIU journal of science engineering and technology*, pp. 12–20, Dec. 2024, doi: 10.59568/KJSET-2024-3-2-02.
- [3] X. Wang, "Digital Signal Processing with FIR Filter Design and Fast Fourier Transform," *Applied and Computational Engineering*, vol. 227, no. 1, pp. 37–45, Mar. 2026, doi: 10.54254/2755-2721/2026.GU32263.
- [4] I. A. Dewi, M. Ichwan, and S. Silfiana, "MIND (Multimedia Artificial Intelligent Networking Database Analisis Forman Frekuensi pada Suara Manusia dengan Menggunakan Linear Prediction)," *Journal MIND Journal | ISSN*, vol. 5, no. 1, pp. 39–53, 2020, doi: 10.26760/mindjournal.v5i1.39.
- [5] S. Harmalita Liu and N. Husna Shabrina, "Comparison of FIR and IIR Filters for Audio Signal Noise Reduction," *Ultima Computing : Jurnal Sistem Komputer*, vol. 15, no. 1, 2023.
- [6] O. : Risma, K. Putri, M. Panji, K. Praja, R. D. Wahyuningrum, and R. A. Rochmanto, "NOISE CANCELLING DENGAN LOW PASS FILTER MENGGUNAKAN METODE ELLIPTIC," Semarang, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.32497/orbith.v21i1.6353>.
- [7] P. Ramadhani, F. Vida Rahmah Wijaya, L. Cheryl Az-Zahra, and A. Sujiwa, "The Application of a Finite Impulse Response Low-Pass Filter for Noise Reduction in Voice Signals," *FARADAY: Journal of Fundamental Physics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2026, [Online]. Available: <https://faraday.upnjatim.ac.id/1>
- [8] J. Christopher, N. Husna Shabrina, C. Cornelia, and Y. Zakhary, "Comparison of FIR Window Filter Variation Results on Pink Noise Audio," *Ultima Computing : Jurnal Sistem Komputer*, vol. 14, no. 1, 2022.
- [9] G. Sudhamsu and D. C. Shastri, "International Journal of INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS IN ENGINEERING Investigation of FIR Filter Design with Computational Tools for Audio Signal Processing," 2024. [Online]. Available: www.ijisae.org
- [10] A. R, S. Samiappan, and M. Prabukumar, "Fine-tuning digital FIR filters with gray wolf optimization for peak performance," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62403-6.

- [11] I. A. Sulaiman, H. M. Hassan, M. Danish, M. Singh, P. K. Singh, and M. Rajoriya, "Design, comparison and analysis of low pass FIR filter using window techniques method," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 3117–3121. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.952.
- [12] R. Avanzato, F. Beritelli, G. Capizzi, and G. Lo Sciuto, "A new design methodology for window-based FIR filters," *Electron. Lett.*, vol. 59, no. 11, Jun. 2023, doi: 10.1049/el2.12815.
- [13] O. Coşkun and K. Avci, "NEW HYBRID WINDOWS BASED ON COSH WINDOW AND THEIR PERFORMANCE ANALYSIS IN FIR DIGITAL FILTER DESIGN," *Konya Journal of Engineering Sciences*, pp. 290–306, Feb. 2024, doi: 10.36306/konjes.1361317.
- [14] K. Avci, "Fractional Kaiser Window with Application to Finite Impulse Response Digital Filter Design," *Preparation of Papers for IEEE TRANSACTIONS and JOURNALS*, vol. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2024.0429000.
- [15] P. Tangkittipon, Y. Tungtragul, A. Jesadamethakajorn, and A. Suksawad, "Designing a frequency filter with optimal parameters for the Kaiser window using an evolutionary heuristic with a bee colony algorithm," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 6, pp. 77–82, 2024, doi: 10.15199/48.2024.06.14.