

Peningkatan Kualitas Sinyal *Photoplethysmography* (PPG) melalui Pendekatan Pra-pemrosesan Multistahap

Fitri Handayani¹, Asep Andang², Firmansyah Maulana Sugiartana Nursuwars³

[Submission: 24-03-2025, Accepted: 30-05-2025]

Abstract— Photoplethysmography (PPG) is a non-invasive technique for measuring various physiological parameters, including blood glucose levels. However, PPG signals are often affected by noise and artefacts that reduce the accuracy of analysis and prediction. Therefore, an effective noise filtering method is needed to make the signal quality and ready for feature extraction for blood glucose estimation.

This study offers a solution to the problem of noise in PPG signals through the application of appropriate pre-processing methods. This study aims to select quality PPG signals through three pre-processing methods: detrend, smoothing, and 0.5-5 Hz bandpass filter. The effectiveness of the three methods was evaluated through ADF test to measure the stationarity of the signal, frequency spectrum analysis to observe the distribution of frequency components, and SNR test to assess the signal to noise ratio. Based on the analysis of 67 data samples, the p -value < 0.05 was obtained, indicating that the signal has reached a stationary condition. In addition, the average test statistic of men is higher than that of women, indicating that men's signals are more stationary after detrend. Meanwhile, 36 samples (54%) had SNR ≥ 20 dB indicating that more than half of the data were of good enough quality for further analysis.

The results show that multi-stage pre-processing improves the quality of PPG signals, validated through quantitative tests of stationarity and SNR values. Thus, the preprocessed and improved quality PPG signals are considered feasible for use in the development of estimation models for various physiological parameters, including blood glucose levels.

Keywords— Bandpass filter; Detrend; Photoplethysmography (PPG); Signal preprocessing; Smooth.

Intisari— *Photoplethysmography* (PPG) adalah teknik non-invasif untuk mengukur berbagai parameter fisiologis, termasuk kadar glukosa darah. Namun, sinyal PPG kerap dipengaruhi derau dan artefak yang menurunkan akurasi analisis dan prediksi. Oleh karena itu, dibutuhkan metode penyaringan derau yang efektif agar sinyal berkualitas dan siap untuk ekstraksi fitur guna estimasi kadar glukosa darah.

Penelitian ini menawarkan solusi terhadap permasalahan derau pada sinyal PPG melalui penerapan metode pra-pemrosesan yang tepat. Penelitian ini bertujuan menyeleksi sinyal PPG berkualitas melalui tiga metode pra-pemrosesan: detrend,

smoothing, dan filter bandpass 0,5–5 Hz. Efektivitas ketiga metode dievaluasi melalui uji ADF untuk mengukur stasioneritas sinyal, analisis spektrum frekuensi untuk mengamati distribusi komponen frekuensi, serta pengujian SNR untuk menilai rasio sinyal terhadap derau. Berdasarkan analisis terhadap 67 sampel data, diperoleh hasil p -value $< 0,05$ yang menunjukkan bahwa sinyal telah mencapai kondisi stasioner. Selain itu, rata-rata statistik uji pria lebih tinggi dibanding wanita, menunjukkan sinyal pria lebih stasioner setelah *detrend*. Sementara itu, sebanyak 36 sampel (54%) memiliki SNR ≥ 20 dB mengindikasikan bahwa lebih dari setengah data memiliki kualitas yang cukup baik untuk analisis lebih lanjut.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pra-pemrosesan multistahap meningkatkan kualitas sinyal PPG, divalidasi melalui uji kuantitatif terhadap stasioneritas dan nilai SNR. Dengan demikian, sinyal PPG yang telah diproses dan memiliki kualitas yang lebih baik dinilai layak untuk digunakan dalam pengembangan model estimasi berbagai parameter fisiologis, termasuk kadar glukosa darah.

Kata Kunci— Detrend; Filter Bandpass; *Photoplethysmography* (PPG); Pra-pemrosesan sinyal; Smooth;

I. PENDAHULUAN

Photoplethysmography (PPG) adalah teknik non-invasif yang digunakan untuk mengukur perubahan volume darah di pembuluh mikro berdasarkan penyerapan cahaya [1]. PPG banyak digunakan dalam pemantauan fisiologis, seperti pengukuran detak jantung [2],[3] saturasi oksigen [4], kolesterol [5], asam urat [5], tekanan darah [6] dan gula darah [7]. Namun, kualitas sinyal PPG sering kali terpengaruh oleh *noise* dan artefak [8],[9] yang berasal dari pergerakan saat pengukuran, variasi tekanan atau gangguan lingkungan, sehingga diperlukan teknik pra-pemrosesan untuk meningkatkan akurasi analisis [10].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan berbagai metode untuk meningkatkan kualitas sinyal PPG, seperti *filtering* [11], *wavelet transform* [12],[13] dan model berbasis *machine learning* [14]. Namun, masih terdapat keterbatasan dalam penerapan metode pra-pemrosesan yang efektif, terutama dalam mempertahankan komponen utama sinyal PPG sambil mengurangi gangguan (*noise*). Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan pra-pemrosesan multistahap yang menggabungkan *detrend* untuk menghilangkan komponen DC, *smooth* untuk meredam fluktuasi tinggi, dan filter *bandpass* untuk mempertahankan frekuensi utama yang berhubungan dengan parameter fisiologis.

Metode pra-pemrosesan yang diusulkan diharapkan dapat meningkatkan kualitas sinyal PPG dengan mengurangi *noise* dan artefak tanpa menghilangkan informasi fisiologis penting.

¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi no 24 Tasikmalaya 46116, (telp: 085221296286; e-mail: 197002008@student.unsil.ac.id)

^{2,3}Dosen, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi no 24 Tasikmalaya 46116, (telp: 085220143434; e-mail: andhangs@unsil.ac.id, firmansyah@unsil.ac.id)

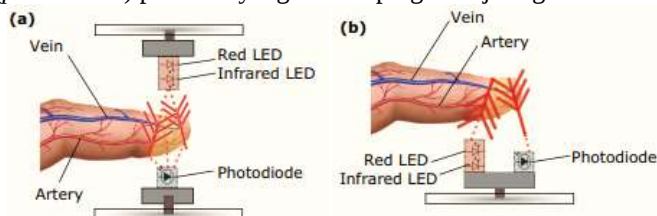


Dengan sinyal yang lebih bersih dan stabil, analisis lebih lanjut seperti ekstraksi fitur dapat dilakukan dengan lebih akurat, sehingga mendukung pengembangan metode estimasi kadar gula darah yang lebih andal. Selain itu, pendekatan ini dapat diterapkan dalam berbagai penelitian terkait parameter fisiologis lainnya, sehingga memperluas penggunaan PPG dalam pemantauan kesehatan berbasis non-invasif.

II. STUDI PUSTAKA

A. Photoplethysmography (PPG)

Photoplethysmography (PPG) merupakan suatu pengukuran yang mengukur perubahan volume organ tubuh di pembuluh kapiler. Teknik ini bekerja dengan mendeteksi fluktuasi volume darah yang disebabkan oleh aliran darah melalui organ tubuh [15]. Sinyal PPG terdiri dari dua komponen penting yaitu komponen AC dan DC. Komponen AC (bolak-balik) merupakan gelombang pulsatil yang disebabkan oleh denyut nadi. Pada gelombang ini terdapat fase anakrotik dan katakrotik yang berhubungan dengan diastol dan komponen DC (searah) merupakan gelombang yang dihasilkan dari penyerapan cahaya di bagian jaringan yang tidak berdenyut seperti darah, otot, tulang, daging dan sebagainya [1]. Metode pengukurannya terdiri dari dua jenis pengukuran yaitu transmisi dan refleksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Transmisi merupakan pengukuran yang menempatkan sumber cahaya (LED) dan fotodetektor (*photodiode*) pada sisi yang berlawanan dari jaringan. Sedangkan refleksi merupakan pengukuran yang menempatkan sumber cahaya (LED) dan fotodetektor (*photodiode*) pada sisi yang berdampingan di jaringan tubuh.



Gambar 1. Metode pengukuran sinyal PPG : (a) transmisi; dan (b) refleksi

B. Detrend

Detrend adalah proses penting dalam analisis sinyal *photoplethysmography* (PPG) yang ditujukan untuk menghilangkan kenaikan atau penurunan nilai rata-rata sinyal (tren jangka panjang) yang bukan dari data fisiologis penting [16]. Penelitian lain menyatakan bahwa penurunan dalam analisis fluktuasi mengganggu untuk interpretasi sinyal yang akurat dalam sinyal PPG [17]. Oleh karena itu, *detrend* dengan metode *moving average* dilakukan untuk mengurangi efek tren dan non-stasioneritas serta meningkatkan keandalan informasi fisiologis yang diekstraksi dari sinyal. Dalam penelitian lain [18] pengurangan kebisingan dilakukan menggunakan *detrend* dengan metode *polynomial* yang dapat mengurangi *noise* dan menghilangkan tren frekuensi rendah. Selain itu, metode *detrend* lain seperti *constant* dapat digunakan secara langsung menggunakan fungsi bawaan MATLAB. Fungsi ini secara otomatis menghitung rata-rata dari sinyal dan menguranginya

dari seluruh nilai dalam data, sehingga tren konstan (*offset*) dapat dihilangkan.

C. Smooth

Smooth (penghalusan) sinyal PPG dilakukan untuk mengurangi *noise* pada sinyal PPG agar pola utama lebih mudah terdeteksi dan analisis menjadi lebih akurat. Proses ini membantu menghilangkan fluktuasi kecil yang tidak relevan, sehingga menghasilkan sinyal yang lebih bersih dan informatif. *Smooth* dengan berbagai metode dapat diterapkan pada sinyal PPG. *Smooth* dengan metode *moving mean* hampir sama dengan filter *moving average* yang memiliki tujuan mereduksi *noise* sinyal PPG dan mempertahankan tren utama dalam data [11]. Metode *smooth moving mean* bekerja dengan menghitung rata-rata dari sejumlah sampel dalam jendela tertentu yang bergerak sepanjang sinyal, menggantikan setiap nilai sinyal dengan rata-rata tersebut untuk menghasilkan sinyal yang lebih halus.

D. Filter Bandpass

Filter bandpass adalah rangkaian filter digital gabungan antara *high-pass filter* dan *low-pass filter* yang melewatkan frekuensi pada daerah tertentu di antara frekuensi *cut-off* pertama dan frekuensi *cut-off* kedua dan meredam frekuensi di luar daerah tersebut. Keunggulan filter ini adalah kemampuannya mengatasi *noise* secara efektif dalam implementasi perangkat lunak atau rangkaian digital [19].

E. Analisis Kualitas Sinyal

Analisis kualitas sinyal PPG bertujuan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh memiliki karakteristik yang memenuhi syarat untuk digunakan dalam analisis lebih lanjut. Berikut analisis kualitas sinyal yang dapat diimplementasikan :

1. Uji Augmented Dickey-Fuller (ADF)

Uji ADF digunakan untuk mengevaluasi apakah suatu sinyal bersifat stasioner, yakni memiliki karakteristik statistik konstan terhadap waktu [20]. Pengujian ini bertujuan untuk menguji hipotesis pada sinyal yang akan di uji. Hipotesis nol harus ditolak (H_0) ketika $p\text{-value} \leq \text{tingkat signifikansi}$ atau jika $\text{test statistic (statistik uji)} \leq \text{critical value}$ (nilai kritis) menandakan bahwa data tersebut stasioner [21]. Sedangkan hipotesis nol tidak boleh ditolak (H_1) ketika nilai $p\text{-value} > \text{tingkat signifikansi}$ atau jika $\text{test statistic (statistik uji)} > \text{critical value}$ (nilai kritis) menandakan bahwa data tersebut tidak stasioner. Sinyal PPG stasioner menandakan sinyal lebih stabil, terbebas dari tren (artefak) sehingga dapat meningkatkan keakuratan pengukuran secara non-invasif.

2. Uji Spektrum Frekuensi

Pra-pemrosesan dilakukan bertujuan untuk mengurangi *noise* pada sinyal, sehingga informasi frekuensi utama dapat terlihat dan *noise* frekuensi tinggi dapat diminimalkan. Dengan melakukan uji spektrum frekuensi, hal ini memberikan representasi energi sinyal terhadap frekuensi dengan memplot spektrum frekuensi

sinyal sebelum dan setelah pra-pemrosesan [22]. *Fast Fourier Transform* (FFT) diterapkan dalam analisis ini karena FFT dapat digunakan untuk menganalisis spektrum frekuensi dan mengamati perubahan amplitudo dalam rentang frekuensi tertentu guna menganalisis karakteristik sinyal PPG [23], [24].

3. Uji Signal to-Noise Ratio (SNR)

SNR didefinisikan sebagai rasio antara daya sinyal yang diinginkan dengan daya derau (*noise*), dan secara luas digunakan sebagai standar ukuran kualitas sinyal. *Noise* pada sinyal PPG dapat merusak informasi yang terdapat dalam sinyal tersebut sehingga mengalami penurunan kualitasnya. Kualitas sinyal ini dapat ditentukan dari nilai SNR yang diukur dalam satuan desibel (dB) [25]. Secara matematis, SNR dapat dinyatakan dalam desibel (dB) dengan rumus:

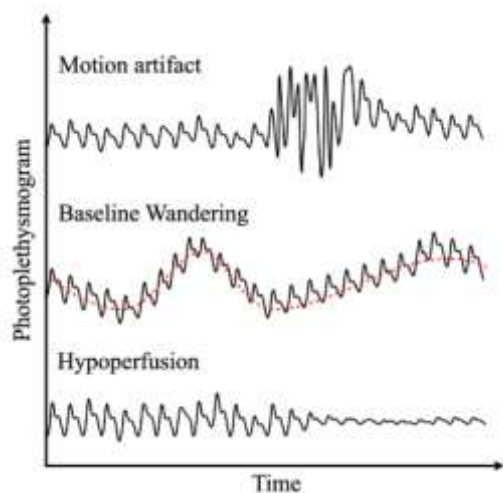
$$SNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (1)$$

Dimana :

P_{signal} = Daya sinyal

P_{noise} = Daya noise

F. Tipe Noise Sinyal Photoplethysmography (PPG)



Gambar 2. Noise sinyal PPG (Motion Artifact, Baseline Wandering, Hypoperfusion)

Dalam sinyal *photoplethysmography* (PPG) terdapat beberapa *noise* yang dapat mendistorsi sinyal [26] dapat dilihat pada Gambar 2. Kualitas sinyal PPG yang diperoleh dipengaruhi oleh berbagai faktor yang melekat seperti permukaan kulit, tempat pengukuran, suhu, laju aliran darah, tingkat saturasi oksigen darah dan juga lingkungan sekitarnya. Beberapa *noise* yang terdapat dalam sinyal *Photoplethysmography* (PPG) adalah sebagai berikut :

1. Motion Artifact

Noise dalam sinyal PPG yang terjadi akibat gerakan tubuh seperti berjalan, berlari ataupun menggerakkan tangan disebut artefak gerakan (*motion artifact*).

Penelitian [27] menunjukkan bahwa frekuensi *noise* akibat gerakan ini biasanya berada di 0,1 Hz, sedangkan penelitian lain [22] menyatakan bahwa rentang frekuensinya adalah 0,01–10 Hz yang dapat tumpang tindih dengan frekuensi utama PPG (0,5-5 Hz). Gangguan derau (*noise*) ini dapat mengganggu saat melakukan deteksi fitur PPG yang berakibat salah diagnosis. Untuk mengatasi hal tersebut, *motion artifact* harus dihilangkan. Dalam penelitian [22] filter *high-pass* dengan frekuensi *cut-off* 0,15 Hz digunakan tanpa mengubah bentuk pulsa PPG, sehingga rasio komponen AC dan DC tetap ideal.

2. Baseline Wandering

Pergeseran *baseline* pada sinyal PPG umumnya disebabkan oleh pernapasan, dengan frekuensi antara 0,15 – 0,5 Hz ([22]. Menurut [28] dan [27] rentang frekuensi pernapasan ini berada di kisaran 0,04 – 1,6 Hz. Untuk menghilangkan pergeseran *baseline wander* ini, filter *high-pass* dapat digunakan. Namun, apabila komponen AC dari sinyal PPG lebih rendah dari frekuensi *cut-off* filter, sinyal bisa mengalami gangguan kebisingan (*distorsi*). Oleh karena itu, *cut-off* harus disesuaikan dengan sinyal PPG yang digunakan.

3. Hypoperfusion

Noise hypoperfusion muncul ketika perfusi darah rendah, yang disebabkan oleh tekanan darah rendah dan mengganggu kualitas sinyal PPG [22]. *Noise* ini dapat mengakibatkan sulitnya memperoleh informasi penting, sehingga pengurangan *noise hypoperfusion* diperlukan agar hasil pengukuran lebih akurat. Pengurangan *noise* dapat dilakukan dengan berbagai metode pra-pemrosesan.

G. Penelitian Terkait

Beberapa pendekatan pra-pemrosesan yang telah diusulkan dalam penelitian sebelumnya mengenai pengurangan *noise* pada sinyal PPG dan pengembangan algoritma mesin pembelajaran. Berikut adalah beberapa penelitian terkait:

Filtering Sinyal Menggunakan *Band Pass Filter* dengan nama peneliti Azhar Al Havis dan Fitria pada tahun 2019 [19] membahas penggunaan filter *bandpass* untuk mengurangi *noise* pada data suara yang dilakukan menggunakan *software* MATLAB 2010b.

Penelitian yang dilakukan oleh Bhanupriya Mishra dan Neelam Sobha Nirala pada tahun 2020 [26] membahas tentang survey berbagai jenis derau (*noise*) yang mempengaruhi sinyal *photoplethysmography* (PPG) dan berbagai metode berdasarkan jenis pemfilteran, *wavelet transform*, dekomposisi mode empiris, analisis komponen *independent* dan *cluster* yang digunakan untuk *denoising* PPG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk menghilangkan *Motion Artifact*, metode berbasis jaringan syaraf tiruan adalah metode terbaik, sedangkan untuk mengurangi *baseline wander* dipilih filter berbasis AMARS. Kemudian untuk mengurangi derau (*noise*) interferensi saluran

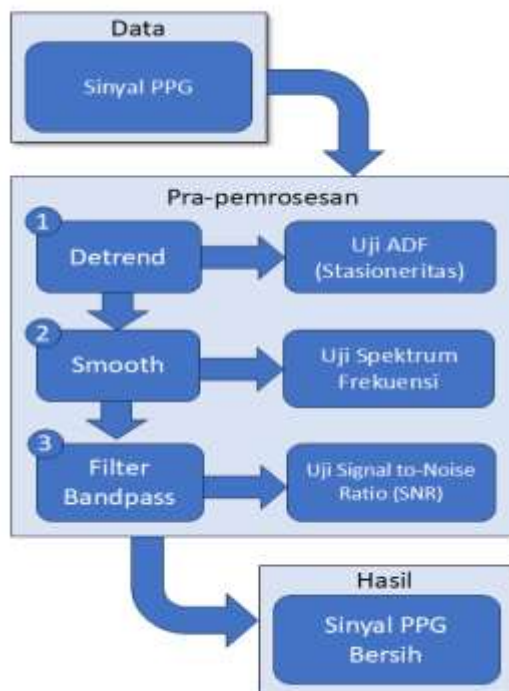


listrik, direkomendasikan teknik berbasis WPT-teknik berbasis ICA.

Penelitian yang dilakukan oleh Mohammed Anes Bereksi Reguig dan Nassima Labdelli pada tahun 2024 [29] membahas tentang pengembangan perangkat non-invasif untuk mengukur gula darah berdasarkan deteksi dan analisis sinyal PPG. Sistem yang dikembangkan pada penelitian meliputi sensor optik untuk mendeteksi sinyal PPG, mendigitalkan dan mengakuisisi papan ke komputer dan program perangkat lunak untuk memproses dan menganalisis sinyal PPG yang telah didigitalkan terkait beberapa fitur yang diekstrak dari bentuk gelombangnya untuk dijadikan sebagai bahan estimasi gula darah.

Penelitian yang dilakukan oleh Yaquelin Verence Pantoja-P dan Javier Yanez Mendiola pada tahun 2024 [20] membahas tentang metode untuk analisis statistik suatu sinyal. Metode ini diterapkan untuk menganalisis pemrosesan sinyal yang dihasilkan oleh kartu akuisisi untuk pengukuran denyut nadi dengan menggunakan metode demodulasi sinkron. Penerapan metode ini memungkinkan studi setiap sinyal yang terdiri dari analisis statistik deskriptif, diikuti dengan analisis tren dan dinamika pergerakan dengan menggunakan uji *Dickey-Fuller* yang diperluas dan eksponen *Hurst*. Metode yang disajikan mendukung perbandingan antara sinyal denyut nadi yang diperoleh dengan metode demodulasi sinkron dan *plethysmography*. Selain itu, untuk mengetahui perbedaan antara sinyal, kedua sinyal dibandingkan dengan menggunakan evaluasi metrik statistik lainnya seperti MAE, RMSE, MSE dan sebagainya.

III. METODOLOGI



Gambar 3. Diagram Alur Pra-pemrosesan Multistage

Tahap pra-pemrosesan data adalah tahap awal dalam analisis sinyal PPG. Proses ini dilakukan untuk menghasilkan sinyal PPG yang bebas dari *noise* atau gangguan yang dapat mempengaruhi analisis. Adapun langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini disajikan pada Gambar 3.

A. Data

Data yang digunakan merupakan dataset yang diperoleh dari platform Mendeley Data yang berjudul “The dataset of Photoplethysmography Signals Collected from a pulse sensor to measure Blood Glucose Level”. Sebanyak 67 data sinyal *photoplethysmography* (PPG) dikumpulkan dari beberapa subjek mencakup parameter fisiologis terkait seperti gula darah invasif (glukometer), tinggi badan, berat badan, usia dan jenis kelamin. Setiap sampel berdurasi 10 detik memiliki 21900 data sampling dengan frekuensi sampling 2175 Hz. Kemudian sinyal ini akan digunakan untuk menganalisis efektivitas metode pra-pemrosesan multistage yang diusulkan guna meningkatkan kualitas sinyal PPG.

B. Pra-pemrosesan

1. Detrend

Proses *detrend* merupakan langkah penting dalam pra-pemrosesan sinyal *photoplethysmography* (PPG) untuk menghilangkan tren jangka panjang yang dapat mengganggu analisis sinyal. Metode *detrend* yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *constant* yang merupakan salah satu fitur yang terdapat di dalam MATLAB.

2. Smooth

Proses *smooth* dilakukan bertujuan untuk mengurangi *noise* dengan cara menghaluskan sinyal PPG. *Smooth* dilakukan menggunakan *toolbox smooth data* yang tersedia pada MATLAB. *Toolbox* ini berisikan beberapa opsi metode penghalusan data yang parameternya dapat diatur sesuai kebutuhan analisis. Metode *smooth* yang digunakan merupakan *smooth moving mean*, dengan parameter *smooth factor* diterapkan sebesar 0,25. Metode ini efektif untuk mengurangi *noise* tanpa mengubah karakteristik utama pada sinyal PPG sehingga dapat meningkatkan kualitas sinyal *photoplethysmography* (PPG).

3. Filter Bandpass

Filter merupakan tahap pra-pemrosesan yang memiliki tujuan untuk menghilangkan *noise* dengan frekuensi rendah maupun tinggi yang terdapat pada sinyal PPG. Dalam penelitian ini diterapkan *filter bandpass*. Frekuensi *Cut-off* yang diterapkan yakni frekuensi rendah sebesar 0,5 Hz sedangkan frekuensi tinggi 5 Hz. Hal ini berdasarkan frekuensi utama sinyal PPG yang berada pada rentang frekuensi tersebut.

C. Uji Hasil Pra-pemrosesan

1. Uji Augmented Dickey-Fuller (ADF)

Sinyal PPG setelah *detrend* kemudian diuji stasioneritasnya dengan menggunakan metode *Augmented Dickey-Fuller* (ADF). Dengan metode ini sinyal akan terlihat apakah stasioner atau non-stasioner berdasarkan *p-value* yang

diperoleh. Untuk pengujian sinyal PPG apabila $p\text{-value} < 0,05$ berarti menandakan sinyal bersifat stasioner sehingga dapat dilakukan analisis lebih lanjut.

2. Uji Spektrum Frekuensi

Sinyal yang sudah melalui proses *smooth* kemudian di uji spektrum frekuensinya untuk melihat bagaimana distribusi frekuensi sinyal berubah setelah diterapkan *smooth*. Tujuan lain dari pengujian ini untuk melihat apakah proses *smooth* berhasil mengurangi *noise* tanpa merusak komponen frekuensi penting dalam sinyal PPG (0,5 – 5 Hz).

3. Uji Signal to-Noise Ratio (SNR)

Sinyal yang sudah di *filter* kemudian dilakukan uji *Signal to-Noise Ratio* (SNR). Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan sinyal informasi (PPG yang dibutuhkan) dengan *noise* yang terdapat pada sebuah sinyal analisis. Semakin tinggi nilai SNR semakin baik kualitas sinyal informasi yang terkandung dalam sinyal tersebut. Dengan demikian, pengujian ini dapat menentukan kualitas dari sebuah sinyal yang terganggu oleh *noise*.

D. Hasil

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini merupakan sinyal PPG bersih yang terbebas dari *noise*. Sinyal yang memiliki kualitas yang baik dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut seperti ekstraksi fitur sinyal PPG, estimasi berbagai parameter fisiologis contohnya tekanan darah dan gula darah.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2021a. Perangkat lunak ini mendukung proses analisis pra-pemrosesan sinyal *photoplethysmography* (PPG) dengan berbagai fitur bawaan, seperti *Signal Analyzer* dan *Signal Labeler* yang memudahkan dalam visualisasi, penyaringan serta proses lainnya. MATLAB R2021a direkomendasikan karena memiliki *toolbox* yang lengkap untuk analisis sinyal, termasuk analisis pra-pemrosesan sinyal yang sangat berguna dalam penelitian ini.

A. Detrend Sinyal PPG

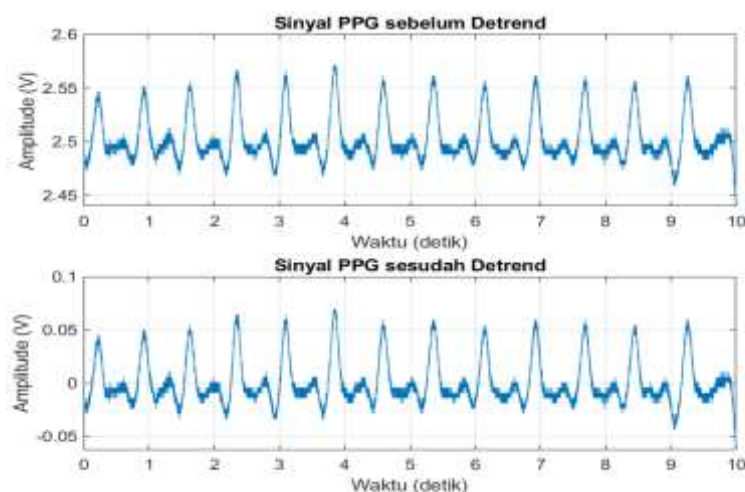
Hasil penerapan metode *constant detrend* menunjukkan bahwa komponen *offset* DC pada sinyal PPG berhasil dihilangkan, sehingga sinyal yang dihasilkan berosilasi di sekitar garis nol dapat dilihat pada Gambar 4. Setelah proses *detrend*, distribusi amplitude sinyal menjadi lebih stabil dan variasi dinamis dari sinyal PPG lebih terlihat jelas. Dengan hilangnya bias akibat faktor eksternal seperti *offset* sensor atau pergerakan selama pengukuran, sinyal ini dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut dengan tingkat akurasi yang lebih baik.

B. Uji Augmented Dickey-Fuller (ADF)

Berdasarkan hasil pengujian *Augmented Dickey-Fuller* (ADF) terhadap sinyal yang telah melalui proses *detrend*, diperoleh *Test Statistic*, *Critical Value*, dan *P-Value* yang menunjukkan bahwa sebagian besar sinyal memiliki *P-Value* $< 0,05$. Hal ini mengindikasikan bahwa sinyal telah mendekati sifat stasioner setelah diterapkan metode *constant detrend*, sehingga analisis lebih lanjut yang dilakukan menjadi lebih valid. Beberapa sinyal yang masih menunjukkan nilai *P-Value* $\geq 0,05$ dapat disebabkan oleh faktor eksternal seperti artefak gerakan atau kualitas sinyal yang kurang baik.

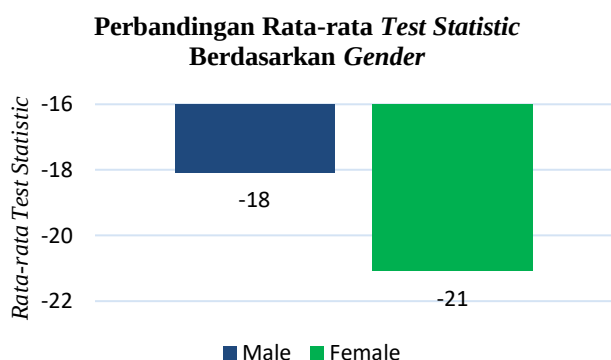
Selain itu, hasil perbandingan rata-rata *test statistic* berdasarkan *gender* yang ditunjukkan pada Gambar 5 menunjukkan adanya perbedaan nilai antara kelompok pria dan wanita. Rata-rata *test statistic* untuk pria lebih tinggi dibandingkan wanita, yang mengindikasikan bahwa kualitas sinyal pria cenderung lebih baik dalam mencapai sifat stasioner setelah proses *detrend*. Perbedaan ini dapat dipengaruhi oleh faktor fisiologis kualitas sinyal saat perekaman atau adanya artefak gerakan yang lebih dominan pada salah satu kelompok.

Dengan demikian, hasil ini mengonfirmasi bahwa proses *detrend* efektif dalam menghilangkan bias yang dapat memengaruhi analisis lebih lanjut. Selain itu, metode ini memastikan bahwa karakteristik dinamis sinyal lebih terjaga sehingga dapat sinyal lebih representatif terhadap kondisi fisiologis seseorang.



Gambar 4. Perbandingan antara sinyal PPG sebelum dan sesudah diterapkan *detrend*





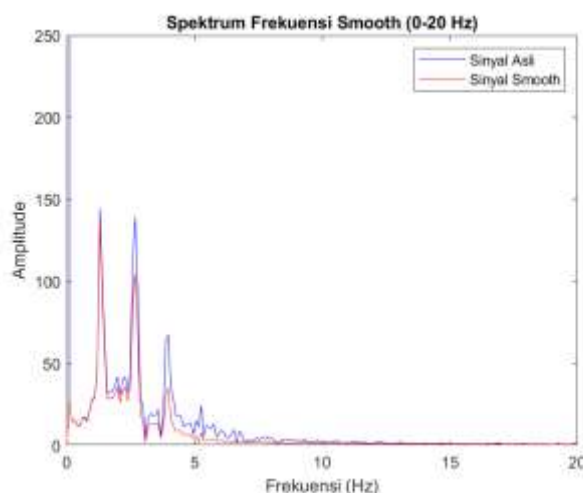
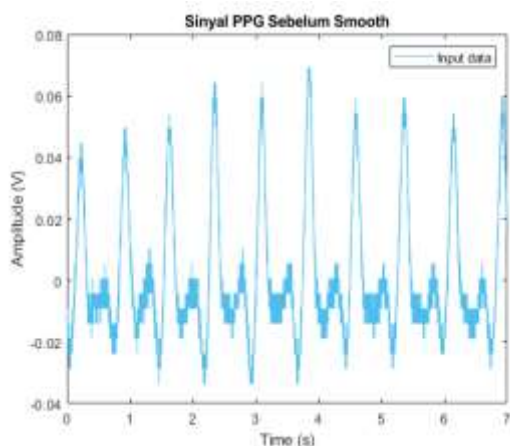
Gambar 5. Diagram perbandingan rata-rata *Test Statistic* yang diperoleh dari pengujian ADF

C. Smooth

Hasil penerapan *smooth moving mean* menunjukkan bahwa fluktuasi kecil yang tidak diinginkan akibat *noise* frekuensi tinggi berhasil dikurangi tanpa mengubah karakteristik utama sinyal PPG. Sinyal yang telah melalui proses *smooth* tampak lebih halus dan lebih stabil dibandingkan dengan sinyal asli sebelum dilakukan pemrosesan yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hal ini mengindikasikan bahwa metode ini efektif dalam meningkatkan kualitas sinyal dengan tetap mempertahankan informasi fisiologis yang terkandung di dalamnya.

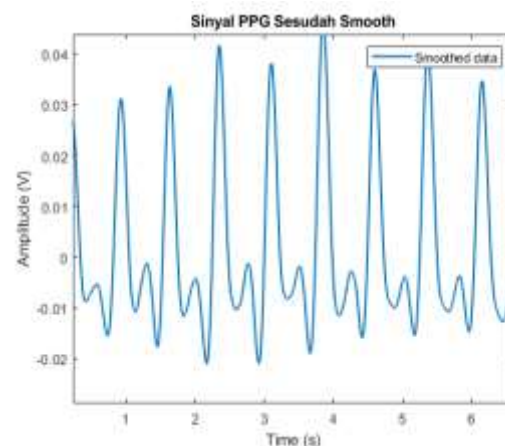
Selain itu, penggunaan *smooth factor* sebesar 0,25 terbukti memberikan hasil yang optimal sesuai dengan karakteristik sinyal PPG. Dengan metode ini, sinyal yang dihasilkan menjadi lebih mudah di analisis karena terbebas dari gangguan *noise* yang dapat memengaruhi proses analisis lebih lanjut. Keberhasilan metode *smooth moving mean* ini juga sejalan dengan prinsip kerja *moving average*, yang bertujuan meredam komponen frekuensi tinggi tanpa menghilangkan informasi penting dari sinyal PPG.

Dengan demikian, hasil ini mengonfirmasi bahwa metode *smooth moving mean* merupakan pendekatan yang tepat dalam pra-pemrosesan sinyal PPG, terutama dalam meningkatkan kualitas sinyal sebelum dilakukan analisis lebih lanjut seperti estimasi parameter fisiologis menggunakan *machine learning*.

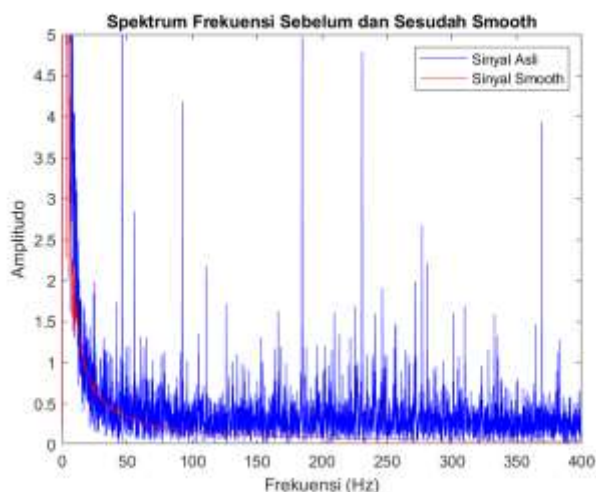


Gambar 7. Hasil Uji Spektrum Frekuensi pada Sinyal PPG

Setelah diterapkan metode *smooth*, spektrum frekuensi mengalami perubahan yang signifikan terutama dalam hal reduksi *noise* frekuensi tinggi. Sebelum dilakukan *smooth*, energi sinyal masih tersebar pada rentang frekuensi lebih tinggi yang dapat mengindikasikan adanya gangguan seperti artefak gerakan atau interferensi dari sumber eksternal. Namun, setelah proses *smooth* amplitudo pada frekuensi di atas 50 Hz berkurang secara signifikan dapat dilihat pada Gambar 8. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam mengurangi fluktuasi kecil yang tidak diinginkan tanpa menghilangkan informasi fisiologis utama dalam sinyal.



Gambar 6. Perbandingan sinyal PPG sebelum dan sesudah proses *smooth* menggunakan metode *moving mean*

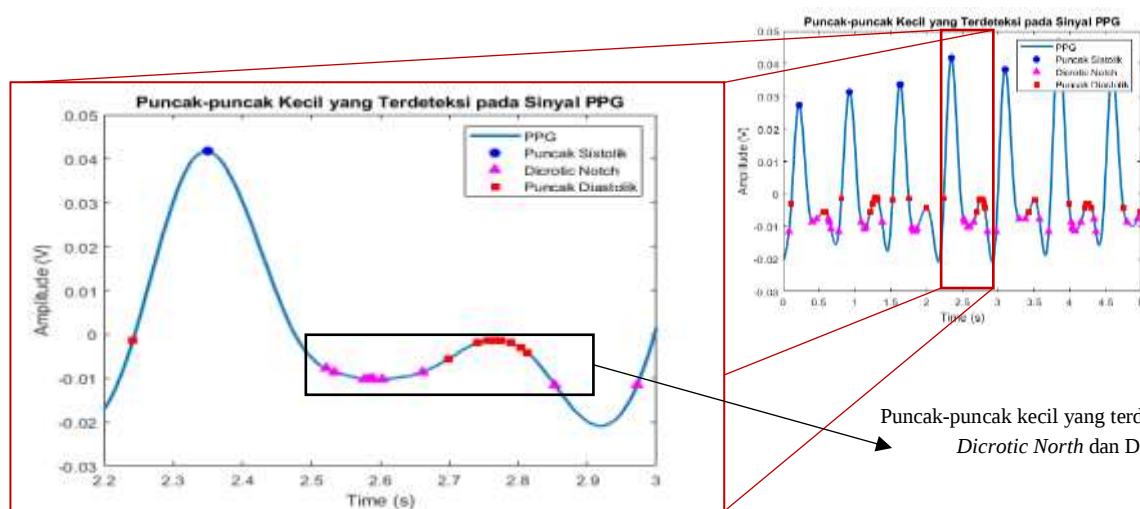


Gambar 8. Spektrum frekuensi pada sinyal PPG setelah *smooth*. Terlihat amplitudo di atas 50 Hz berkurang secara signifikan

Dengan demikian, penerapan *smooth* dalam sinyal PPG yang di analisis spektrum frekuensi terbukti meningkatkan kualitas sinyal dengan menghilangkan *noise* frekuensi tinggi, sekaligus mempertahankan komponen dominan pada frekuensi rendah yang relevan dengan informasi fisiologis. Hasil ini menegaskan bahwa metode *smooth* yang digunakan merupakan pendekatan yang tepat untuk meningkatkan keandalan analisis sinyal PPG.

E. Filter Bandpass

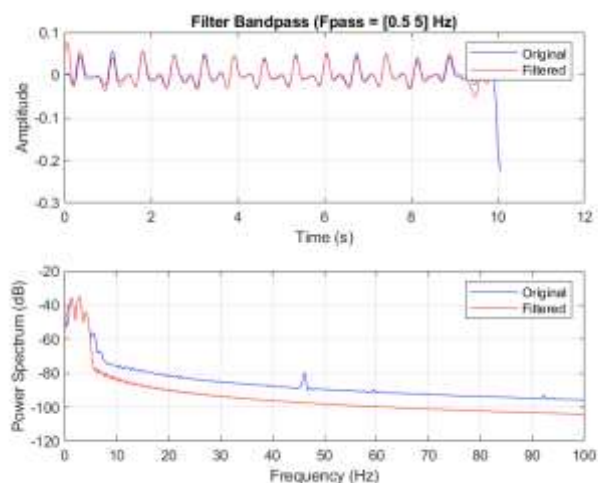
Hasil pra-pemrosesan sinyal PPG melalui *detrend* dan *smooth* menunjukkan adanya pengurangan *noise*, yang terlihat dari bentuk sinyal yang lebih stabil dan minim fluktuasi kecil yang tidak diinginkan. Namun, setelah dilakukan deteksi puncak sistolik dan diastolik masih ditemukan puncak-puncak kecil yang kemungkinan besar berasal dari artefak fisiologis ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Puncak-puncak kecil yang terdeteksi pada sinyal PPG akibat artefak gerakan (*noise*)

Artefak ini dapat disebabkan oleh gerakan tubuh, variasi tekanan darah alami atau kesalahan penempatan sensor selama pengukuran. Meskipun metode *detrend* mampu menghilangkan *offset* DC dan *smooth* mampu meredam gangguan frekuensi tinggi, artefak gerakan ini tetap bertahan jika pola gangguannya menyerupai karakteristik fisiologis sinyal PPG.

Untuk mengatasi permasalahan ini, diterapkan *filter bandpass* dengan rentang frekuensi 0,5 – 5 Hz sesuai dengan karakteristik fisiologis sinyal PPG. *Filter* ini berfungsi untuk meredam komponen frekuensi tinggi di atas 5 Hz serta frekuensi sangat rendah di bawah 0,5 Hz yang umumnya tidak memiliki informasi penting terkait detak jantung atau perfusi darah. Penerapan *filter* ini menghasilkan sinyal yang lebih bersih dan halus dengan pengurangan amplitudo pada frekuensi di luar rentang informasi fisiologis, sebagaimana ditunjukkan dalam analisis spektrum frekuensi dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil *Filter Bandpass* pada Sinyal *Photoplethysmography* (PPG)



Keberhasilan *filter bandpass* dalam mereduksi *noise* juga dapat diamati dari penurunan daya (dB) pada frekuensi di luar 0,5-5 Hz. Dengan demikian, hanya komponen frekuensi yang relevan secara fisiologis yang dipertahankan. Selain itu, dengan meningkatnya kualitas sinyal setelah filtrasi, analisis lebih lanjut seperti ekstraksi fitur sinyal PPG menjadi lebih representatif terhadap kondisi fisiologis yang sebenarnya. Oleh karena itu, estimasi kadar gula darah maupun tekanan darah dapat dilakukan karena fitur yang digunakan dalam model prediksi berasal dari komponen sinyal yang valid dan tidak terdistorsi oleh *noise* atau artefak.

F. Uji Signal to-Noise Ratio (SNR)

Setelah proses *filter*, langkah selanjutnya adalah pengujian *Signal to-Noise Ratio* (SNR) untuk mengukur sejauh mana *noise* telah berkurang serta memastikan bahwa sinyal PPG memiliki kualitas yang memadai untuk dianalisis lebih lanjut. Nilai SNR yang tinggi menunjukkan dominasi sinyal utama dibandingkan *noise*, yang berarti sinyal PPG lebih bersih dan lebih representatif terhadap informasi fisiologis yang ingin dianalisis.

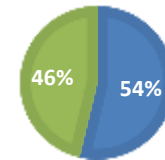
Hasil pengujian SNR disajikan dalam Gambar 11 menunjukkan bahwa setelah diterapkan proses *filter bandpass* (0,5-5 Hz), sebanyak 54% sinyal memiliki $\text{SNR} \geq 20$ dB, sementara 46% sisanya masih memiliki $\text{SNR} < 20$ dB. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar sinyal mengalami peningkatan kualitas setelah dilakukan *filtering*, dimana *noise* frekuensi rendah dan tinggi berhasil direduksi tanpa menghilangkan komponen utama dari sinyal PPG.

Namun, persentase 46% sinyal yang masih memiliki $\text{SNR} < 20$ dB merupakan jumlah yang cukup signifikan dan menunjukkan bahwa artefak dan *noise* tertentu belum sepenuhnya tereliminasi selama proses *filtering*. Berdasarkan evaluasi lebih lanjut, parameter-parameter yang menyebabkan tingginya *noise* pada sinyal ini berasal dari karakteristik data mentah (*raw data*) yang tidak berhubungan langsung dengan fokus utama penelitian, seperti pergerakan subjek yang berlebihan saat perekaman, kualitas perangkat perekam, atau gangguan lingkungan. Faktor-faktor tersebut berada di luar kendali proses pemrosesan sinyal dan tidak dapat diatasi hanya dengan metode *filtering* konvensional. Oleh karena itu, untuk menjaga validitas data dan memastikan bahwa hasil analisis tidak terpengaruh oleh gangguan eksternal, dalam penelitian ini hanya sinyal dengan $\text{SNR} \geq 20$ dB yang digunakan untuk tahap analisis lebih lanjut. Pemilihan ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi hasil dan menjamin bahwa informasi fisiologis yang diperoleh benar-benar mencerminkan kondisi sebenarnya dari subjek yang diamati.

Distribusi nilai SNR yang ditunjukkan dalam diagram *pie* juga mengindikasikan adanya variasi tingkat *noise* dalam data yang direkam. Sinyal dengan $\text{SNR} < 20$ dB cenderung memiliki *noise* yang tinggi, sehingga lebih sulit dianalisis. Sementara, sinyal dengan $\text{SNR} \geq 20$ dB lebih mudah diolah untuk dianalisis. Dengan demikian, proses *detrend*, *smooth* dan *filter* menjadi langkah penting dalam pra-pemrosesan sinyal PPG untuk meningkatkan kualitas sinyal sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

Distribusi SNR Setelah Filtering

■ $\text{SNR} \geq 20$ dB ■ $\text{SNR} < 20$ dB



Gambar 11. Distribusi hasil pengujian SNR setelah proses *filter bandpass*

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan metode pra-pemrosesan multistap (*detrend*, *smooth* dan *filter bandpass* 0,5-5 Hz) untuk meningkatkan kualitas sinyal PPG. Kebaruan utama terletak pada integrasi ketiga tahap ini, yang saling melengkapi dalam menekan *noise* tanpa menghilangkan informasi fisiologis inti. Hasil evaluasi menunjukkan peningkatan signifikan ditandai dengan seluruh sinyal memenuhi kriteria stasioner (Uji ADF), spektrum frekuensi relevan (0,5-5 Hz) berhasil dipertahankan, dan 54% sampel mencapai $\text{SNR} \geq 20$ dB yang merupakan indikator kualitas sinyal klinis untuk analisis lanjutan pada aplikasi medis, seperti pemantauan glukosa darah. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan pengambilan data berdasarkan *hardware* berdesain *low-noise* dan ekstraksi fitur berbasis *machine learning* guna meningkatkan akurasi prediksi glukosa darah.

REFERENSI

- [1] T. Y. Abay and P. A. Kyriacou, "Photoplethysmography in oxygenation and blood volume measurements," *Photoplethysmography*, pp. 147–188, 2022, doi: 10.1016/b978-0-12-823374-0.00003-7.
- [2] S. K. Singha and M. Ahmad, "Noninvasive Heart Rate and Blood Glucose Level Estimation Using Photoplethysmography," *2021 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Sustain. Dev. ICICT4SD 2021 - Proc.*, pp. 151–155, 2021, doi: 10.1109/ICICT4SD50815.2021.9396849.
- [3] R. Agung and A. Suryawan, "Perancangan Dan Realisasi Penghitung Frekuensi Detak Jantung Berbasis Mikrokontroler AT89S52," vol. 6, no. 2, pp. 13–19, 2007.
- [4] M. Elgendi, "On the Analysis of Photoplethysmogram Signal," *Curr. Cardiol. Rev.*, vol. 8, no. c, pp. 14–25, 2012.
- [5] D. Sutarya, "Sistem Monitoring Kadar Gula Darah, Kolesterol dan Asam Urat secara Non Invasive menggunakan Sensor GY-MAX 30100," *J. JOULE*, vol. Vol 1, no. 25–34, pp. 1907–2546, 2021, [Online]. Available: <http://journal.univpancasila.ac.id/index.php/joule/>
- [6] F. B. Reguig, "Photoplethysmogram signal analysis for detecting vital physiological parameters: An evaluating study," *2016 Int. Symp. Signal, Image, Video Commun. ISIVC 2016*, pp. 167–173, 2017, doi: 10.1109/ISIVC.2016.7893981.
- [7] E. Susana, K. Ramli, P. D. Purnamasari, and N. H. Aprianoro, "Non-Invasive Classification of Blood Glucose Level Based on Photoplethysmography Using Time-Frequency Analysis," *Inf.*, vol. 14, no. 3, 2023, doi: 10.3390/info14030145.
- [8] A. K. Bhoi and S. Sarkar, "Noise Cancellation of PPG Signals using Wavelet Transformation," *Int. J. Electron. Commun. Comput. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 2278–4209, 2012.
- [9] P. Madona, "Akuisisi Data Sinyal Photoplethysmograph (PPG) Menggunakan Photodiode," *J. Elektro dan Mesin Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 32–41, 2016, doi: 10.35143/elementer.v2i2.187.
- [10] E. Mejia-Mejia, J. Allen, K. Budidha, C. El-Hajj, P. A. Kyriacou, and P. H. Charlton, *Photoplethysmography signal processing and*

- synthesis. 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-823374-0.00015-3.
- [11] Y. Chen, D. Li, Y. Li, X. Ma, and J. Wei, "Use moving average filter to reduce noises in wearable PPG during continuous monitoring," *Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Telecommun. Eng. LNICST*, vol. 181 LNICST, pp. 193–203, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-49655-9_26.
- [12] A. Luke, S. Shaji, and K. A. U. Menon, "Motion Artifact Removal and Feature Extraction from PPG Signals Using Efficient Signal Processing Algorithms," *2018 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Informatics*, pp. 624–630, 2018.
- [13] A. A. M. A. Istri Iswari, I. M. O. Widyantara, and R. S. Hartati, "Penerapan Wavelet Daubechies pada Teknik Estimasi Gerak Bilateral," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 1, p. 143, 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i01.p19.
- [14] A. P. Study, "An In-Ear PPG-Based Blood Glucose Monitor :," 2023.
- [15] Amalia Yunia Rahmawati, *PPG Signal Analysis An Introduction Using MATLAB*, no. July. 2021.
- [16] S. N. Nampoothiri, R. K. Pathinarupothi, M. V. Ramesh, and K. A. U. Menon, "Comparison of Infrared and Red Photoplethysmography signals for Non-calibrated Non-invasive Blood Glucose Monitoring," *2020 IEEE Reg. 10 Symp. TENSYP 2020*, no. June, pp. 1568–1571, 2020, doi: 10.1109/TENSYP50017.2020.9230743.
- [17] M. Höll, K. Kiyono, and H. Kantz, "Theoretical foundation of detrending methods for fluctuation analysis such as detrended fluctuation analysis and detrending moving average," *Phys. Rev. E*, vol. 99, no. 3, pp. 1–20, 2019, doi: 10.1103/PhysRevE.99.033305.
- [18] A. González-López and P. A. Campos-Morcillo, "Efficient detrending of uniform images for accurate determination of the noise power spectrum at low frequencies," *Phys. Med. Biol.*, vol. 64, no. 10, 2019, doi: 10.1088/1361-6560/ab1a68.
- [19] A. Al Havis and L. Fitria, "Filtering Sinyal Menggunakan Band Pass Filter," *J. SIFO Mikroskil*, vol. 19, no. 2, pp. 37–48, 2018, doi: 10.55601/jsm.v19i2.594.
- [20] Y. V. Pantoja-Pacheco and J. Yáñez-Mendiola, "Method for the Statistical Analysis of the Signals Generated by an Acquisition Card for Pulse Measurement," *Mathematics*, vol. 12, no. 6, pp. 1–24, 2024, doi: 10.3390/math12060923.
- [21] J. Rumiński, "Reliability of pulse measurements in videoplethysmography," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 359–371, 2016, doi: 10.1515/mms-2016-0040.
- [22] J. Park, H. S. Seok, S. S. Kim, and H. Shin, "Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review," *Front. Physiol.*, vol. 12, no. March, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3389/fphys.2021.808451.
- [23] G. Ladeira, N. Marwan, J. B. Destro-Filho, C. Davi Ramos, and G. Lima, "Frequency spectrum recurrence analysis," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-77903-4.
- [24] M. S. Ummah, "Ekstraksi Fitur Alat Musik Tradisional Menggunakan Transformasi Kosinus Diskrit," *Sustain.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2019.
- [25] A. D. Haq, I. Santoso, and Z. A. A. Macrina, "Estimasi Signal To Noise Ratio (SNR) Menggunakan Metode Korelasi," *Transient*, vol. 1, no. 4, pp. 1–8, 2012.
- [26] B. Mishra and N. S. Nirala, "A Survey on Denoising Techniques of PPG Signal," *2020 IEEE Int. Conf. Innov. Technol. INOCON 2020*, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1109/INOCON50539.2020.9298358.
- [27] I. A. Majeed, S. Jos, R. Arora, K. Choi, and S. Bae, "Motion Artifact Removal of Photoplethysmogram (PPG) Signal," *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, vol. 560037, pp. 5576–5580, 2019, doi: 10.1109/EMBS.2019.8857131.
- [28] A. S. Karavaev *et al.*, "Low-frequency component of photoplethysmogram reflects the autonomic control of blood pressure," *Biophys. J.*, vol. 120, no. 13, pp. 2657–2664, 2021, doi: 10.1016/j.bpj.2021.05.020.
- [29] M. A. B. Reguig and N. Labdelli, "Blood glucose prediction using non-invasive optical system based on photoplethysmography," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 5200–5208, 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i5.pp5200-5208.
- [30] N. I. F. M. Lahil *et al.*, "Non-Invasive Blood Pressure and Heart Rate Sensing Using Photoplethysmogram Sensor," *Proceeding - 2021 IEEE 17th Int. Colloq. Signal Process. Its Appl. CSPA 2021*, no. March, pp. 156–160, 2021, doi: 10.1109/CSPA52141.2021.9377302.



{ Halaman ini sengaja dikosongkan }