

Prototype PPG (Photoplethysmography) Secara Real-time sebagai Pendeteksi Dini Gangguan Detak Jantung Dilengkapi dengan Visual Graph pada Android

Real-time PPG (Photoplethysmography) Prototype for Early Detection of Heart Rhythm Disorders with Visual Graphs on Android

Sri Mulyani¹, Hilman Zarory^{*2}, Aulia Ullah³, Jufrizel⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. HR. Soebrantas Km. 15, Pekanbaru, Indonesia

^{*2}Corresponding author: hilman.zarory@uin-suska.ac.id

¹riani3501@gmail.com, ³aulia.ullah@uin-suska.ac.id, ⁴jufrizel@uin-suska.ac.id

Received on 20-05-2024, accepted on 01-07-2024, published on 29-07-2024

Abstrak

Kesehatan jantung adalah faktor vital dalam menjaga kesehatan tubuh manusia. Salah satu teknologi terkini untuk pemantauan kesehatan jantung adalah PPG (*Photoplethysmography*), yang memberikan data esensial mengenai detak jantung dan kondisi kardiovaskular. Namun, teknologi PPG yang dikembangkan sebelumnya seringkali terbatas pada perangkat yang tidak portabel dan sulit untuk mendapatkan data kestabilan irama jantung yang lebih mendetail. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *prototype* PPG secara *real-time* dengan visualisasi grafis di *platform* android. Perancangan perangkat keras melibatkan sensor MAX30102, Arduino Uno, dan modul ESP8266. Bagian perangkat lunak mencakup pengembangan antarmuka pengguna menggunakan Cocos2d-x dan Android Studio, memungkinkan visualisasi sinyal PPG, pengukuran BPM (*Beat Per Minute*), serta statistik seperti rata-rata BPM, 10 periode sinyal, dan standar deviasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *prototype* mampu menampilkan sinyal PPG dengan baik dan stabil dalam 4.07 detik setelah penempatan jari pada sensor, menghasilkan nilai BPM dalam 5.92 detik, nilai rata-rata BPM dalam 11.49 detik, dan memulihkan stabilitas sinyal dalam 3.27 detik setelah gangguan input. *Error* mencapai 2.91% untuk nilai BPM dan 2.13% untuk nilai rata-rata BPM. Penelitian ini menggunakan alat deteksi detak jantung secara *real-time* dengan respon dan akurasi yang baik.

Kata kunci: Android, PPG, Photoplethysmography, Real-time, Visual Grafik

Abstract

Heart health is vital in maintaining human body wellness. One of the latest technologies for monitoring heart health is PPG (*Photoplethysmography*), providing essential data on heart rate and cardiovascular conditions. However, previously developed PPG technology often has limitations, including non-portable devices and difficulty in obtaining detailed data on heart rhythm stability. This research aims to develop a real-time prototype PPG with graphical visualization on the Android platform. Hardware design involves the MAX30102 sensor, Arduino Uno, and ESP8266 module. The software part includes user interface development using Cocos2d-x and Android Studio, allowing PPG signal visualization, BPM (*Beat Per Minute*) measurement, and statistics such as average BPM, 10 signal periods, and standard deviation. Test results demonstrate that the prototype effectively displays stable PPG signals within 4.07 seconds after finger placement on the sensor, retrieves BPM value within 5.92 seconds, average BPM value within 11.49 seconds, and restores signal stability within 3.27 seconds post-input disturbance. The error

rate reaches 2.91% for the BPM value and 2.13% for the average BPM value. This research promises the utilization of real-time heart rate detection devices with good response time and accuracy.

Keywords: Android, PPG, Photoplethysmography, Real-time, Visual Graph

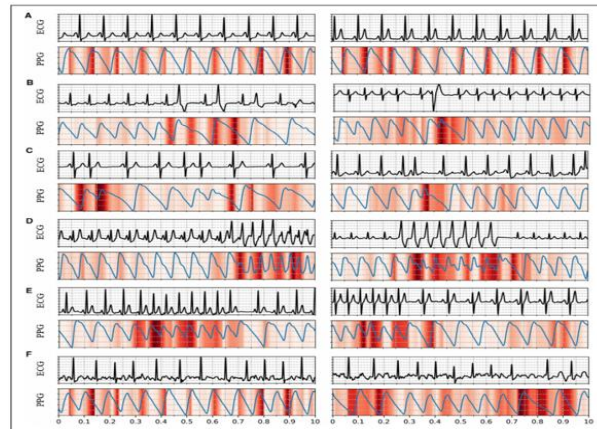
I. PENDAHULUAN

Kesehatan jantung merupakan aspek vital dalam menjaga kesehatan tubuh manusia. Seiring dengan perkembangan teknologi, pengembangan alat monitoring kesehatan organ vital seperti jantung menjadi semakin penting untuk mendeteksi dini gangguan dan memastikan kualitas hidup yang optimal. Dalam kaitannya dengan pentingnya memiliki metode pemeriksaan dini yang efektif dalam menilai kondisi kesehatan pasien, terutama terkait dengan kesehatan kardiovaskular, PPG telah menunjukkan potensi dalam memberikan informasi diagnostik yang sederhana, aman, dan berbiaya rendah [1][2][3]. Selain itu PPG mengalami peningkatan popularitas sebagai pemeriksaan kesehatan yang diprediksi akan menjadi umum dalam praktik medis di berbagai bidang, termasuk kardiologi, respirasi, neurologi, dan kebugaran [4].

PPG adalah sebuah teknologi yang memungkinkan pengukuran jumlah cahaya yang diserap oleh pembuluh darah, darah, dan jaringan tubuh. Sinyal yang dihasilkan dapat diterjemahkan menjadi berbagai parameter fisiologis, termasuk variasi volume aliran darah, variabilitas detak jantung, dan tekanan darah. Sebagai hasilnya, sinyal PPG dapat memberikan informasi biologis yang beragam dan berguna untuk mendeteksi serta mendiagnosis berbagai masalah kesehatan[2]. Selain memberikan informasi tentang sirkulasi darah dan detak jantung, PPG juga dapat memberikan informasi terkait pendeteksian hipertensi [5].

Penggunaan PPG telah menjadi bagian integral dalam pemantauan kesehatan jantung yang non-invasif. Teknologi ini memberikan informasi penting tentang detak jantung dan kondisi kardiovaskular yang relevan. Dengan PPG, deteksi perubahan denyut nadi dalam volume darah di dalam jaringan pembuluh darah dapat dilakukan setiap detak jantung. PPG juga memberikan informasi diagnostic yang sederhana namun merupakan metode pemeriksaan dini yang efektif dan dibutuhkan untuk menentukan apakah pasien perlu penanganan lebih lanjut. Namun, untuk memahami informasi yang terkandung dalam sinyal PPG, sinyal tersebut perlu ditampilkan dengan jelas agar informasi penting yang terkandung di dalamnya dapat dipahami dengan baik. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang sinyal PPG dan kemampuan untuk menginterpretasikannya menjadi kunci dalam mendapatkan wawasan yang berharga dalam kesehatan jantung dan kondisi kardiovaskular secara keseluruhan.

Selain itu, potensi PPG dalam mendiagnosis aritmia jantung telah memperkuat peran teknologi ini dalam bidang kesehatan kardiovaskular. kondisi yang tergolong sebagai aritmia adalah laju denyut dengan frekuensi terlalu cepat yaitu lebih dari 100 kali per menit atau frekuensi terlalu lambat yaitu 60 kali per menit, irama yang tidak teratur, irama yang berasal bukan dari nodus SA (Sinoatrial Node), maupun adanya hambatan impuls supra atau intraventricular [6]. Penggunaan sinyal PPG telah menunjukkan kelayakan dalam mengklasifikasikan jenis aritmia multikelas, menyoroti relevansi teknologi PPG dalam deteksi aritmia dan pemantauan jangka panjang. Deskripsi bentuk sinyal PPG untuk berbagai ritme aritmia memberikan pemahaman tentang bagaimana informasi aritmia dapat diambil dari sinyal PPG [7]. Gambar 1. menampilkan perbedaan bentuk dari enam ritme denyut nadi yang berbeda yang disebabkan oleh aritmia. Gambar tersebut menggambarkan berbagai pola ritme denyut nadi, dengan perbedaan jelas dalam periode dan amplitudo gelombang sinyal PPG.



Gambar 1. Bentuk Sinyal PPG dari 6 Ritme Denyut Nadi yang Berbeda dalam Pengklasifikasian Aritmia [7].

Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan pengolahan sinyal PPG untuk mendapatkan nilai BPM (*Beat Per Minute*). Misalnya, penelitian [8] menghasilkan alat yang dapat menyimpan data pengguna namun tidak menampilkan sinyal PPG pada layar komputer. Penelitian serupa [9] menghasilkan data yang dapat diakses melalui aplikasi Blynk pada *smartphone* Android. Selain itu, *prototype* PPG [10] mampu menyimpan data dalam microSD, tetapi juga tidak dilengkapi dengan grafik visual penampil sinyal PPG. Penelitian lainnya adalah pemantauan kesehatan jantung berbasis sistem online yang menggabungkan sistem pakar VCIRS (Variable Centered Intelligence Rule System), pengukuran detak jantung BPM dan teknologi Internet of Things (IoT) [11]. Penelitian ini memberikan informasi kesehatan jantung berdasarkan nilai BPM yang terdeteksi.

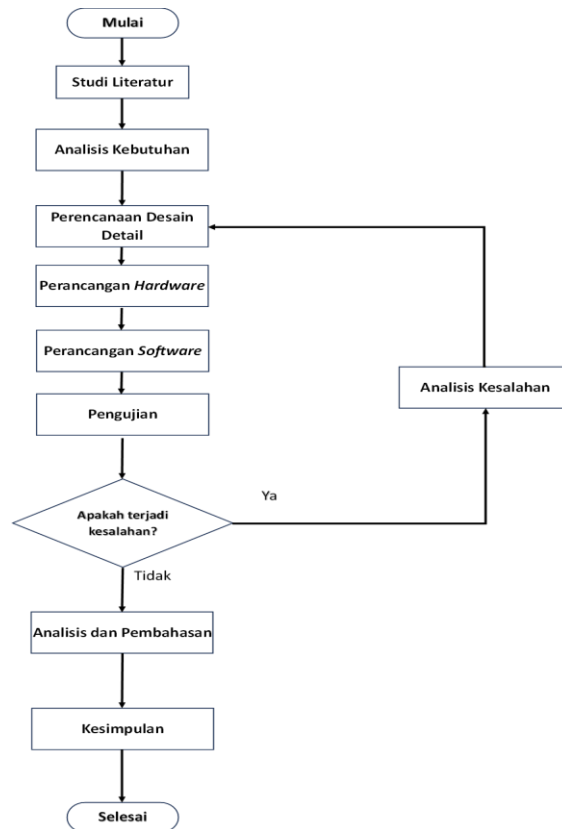
Perancangan alat dalam penelitian lainnya [12][13] menunjukkan beberapa karakteristik umum dalam alat pemantau detak jantung berbasis PPG. Alat-alat tersebut umumnya mampu mengukur BPM dan menampilkan sinyal PPG pada layar komputer/laptop atau osiloskop untuk diolah atau diteliti lebih lanjut. Penelitian [14] mendesain alat pendeteksi berbentuk gelang tangan yang memungkinkan pengguna untuk bergerak bebas, namun masih memerlukan perangkat yang lebih besar seperti osiloskop untuk melihat sinyal PPG. Penelitian-penelitian ini meskipun mendapatkan informasi bentuk sinyal PPG namun masih belum bersifat mobile. Penelitian terkait PPG pada sistem mobile dengan fitur yang dapat menampilkan sinyal PPG dan BPM telah dilakukan [15], namun penelitian ini tidak dilengkapi dengan fitur untuk melihat runtutan periode detak jantung, sehingga sulit untuk mengetahui kestabilan detak jantung

Beberapa penelitian sebelumnya memiliki keterbatasan dalam visualisasi sinyal PPG secara real-time pada perangkat mobile dan tidak dilengkapi dengan nilai runtutan periode detak jantung. Hal ini menghambat analisis mendalam terkait pola-pola dalam sinyal PPG yang penting untuk diagnosis kesehatan jantung. Dalam penelitian ini, diperkenalkan prototipe alat monitoring kesehatan jantung yang menggunakan teknologi PPG secara real-time. Alat ini dirancang untuk mendeteksi dini gangguan detak jantung, termasuk aritmia, dengan fitur utama menyajikan visual sinyal PPG secara real-time, penyajian nilai BPM, pembacaan rentang waktu antar denyut nadi, serta menampilkan 10 data periode terakhir beserta standar deviasinya untuk melihat kestabilan irama detak jantung pada platform Android.

Fitur tambahan pada penelitian ini memungkinkan analisis lebih mendalam terkait pola dalam sinyal PPG, yang mencerminkan variasi volume aliran darah dan dapat diidentifikasi sebagai detak jantung normal atau abnormal. Misalnya, pola dengan amplitudo dan interval yang konsisten menunjukkan irama detak jantung yang stabil, sedangkan pola dengan variasi signifikan dapat mengindikasikan adanya aritmia atau kondisi kardiovaskular lainnya. Dengan menampilkan 10 data periode terakhir dan standar deviasinya, pengguna dapat lebih mudah memantau kestabilan detak jantung mereka. Aplikasi yang dikembangkan memberikan aksesibilitas yang lebih luas melalui platform Android, memperluas cakupan pemantauan detak jantung kepada pengguna secara umum. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam deteksi dini dan pemantauan gangguan detak jantung, meningkatkan pemahaman tentang aplikasi PPG, serta mendorong perkembangan teknologi untuk kesehatan jantung yang lebih baik.

II. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah penelitian meliputi serangkaian tahapan sistematis pada Gambar 2 yang dimulai dari studi literatur. Langkah ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang mendalam tentang latar belakang dan konteks penelitian, mengidentifikasi celah penelitian sebelumnya. studi literatur ini memberikan dasar yang kokoh untuk merumuskan hipotesis, menentukan metodologi penelitian, dan merancang alat yang sesuai dengan kebutuhan penelitian kami. Tahapan selanjutnya analisis kebutuhan alat yang diinginkan, baik dari segi hardware maupun software, yang akan menjadi dasar dalam perancangan dan implementasi alat deteksi. Setelah itu, dilakukan perancangan alat yang mencakup perancangan hardware untuk mengubah spesifikasi menjadi desain fisik yang nyata, serta perancangan software untuk mengembangkan kode dan algoritma yang diperlukan serta merancang antarmuka pengguna yang *user-friendly*. Pengujian kemudian dilakukan untuk memvalidasi kinerja sistem secara menyeluruh dan mengidentifikasi potensi kelemahan yang perlu diperbaiki. Hasil dari pengujian ini menjadi dasar analisis dan pembahasan untuk mengevaluasi kinerja alat deteksi yang telah dikembangkan. Jika terdapat kesalahan atau permasalahan pada alat selama pengujian, dilakukan proses *troubleshooting* atau analisis kesalahan untuk menemukan penyebabnya dan kembali ke tahap perancangan ulang jika diperlukan. Setelah alat dianggap berfungsi dengan baik, dilakukan analisis dan pembahasan terhadap data yang diperoleh dari pengujian. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat, mengidentifikasi potensi pengembangan lebih lanjut, dan menarik kesimpulan terkait dengan pencapaian tujuan penelitian. Terakhir, kesimpulan dan saran disampaikan berdasarkan temuan dari analisis yang telah dilakukan untuk memberikan panduan bagi penelitian dan pengembangan selanjutnya di bidang ini.



Gambar 2. Diagram Alir Metodologi Penelitian

A. Alat dan Bahan

Spesifikasi alat ini mencakup pemilihan sensor, platform perangkat keras, dan lingkungan pengembangan perangkat lunak yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Bahan dan alat yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

1. Sensor MAX30102: MAX30102 merupakan sebuah modul monitor detak jantung dan oksimetri denyut terintegrasi yang menggabungkan LED *internal*, fotodetektor, elemen optik, dan elektronik

rendah *noise* dengan kemampuan penolakan cahaya ambient. Dengan operasionalnya menggunakan satu sumber daya 1.8V dan sumber daya terpisah 3.3V untuk LED internal, MAX30102 dapat berkomunikasi melalui antarmuka I2C standar yang kompatibel. MAX30102 juga menawarkan rentang suhu operasi yang luas, mulai dari -40°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$.

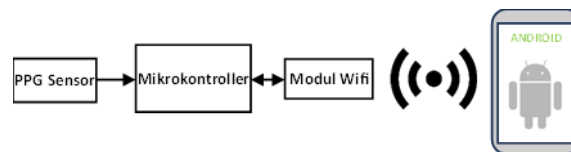
2. Arduino Uno: Mikrokontroler Arduino Uno dipilih sebagai platform perangkat keras untuk mengontrol dan memproses data dari sensor MAX3210. Kemampuan pemrosesan dan fleksibilitas Arduino Uno menjadikannya solusi yang cukup untuk aplikasi ini.
3. ESP8266: Modul ESP8266 digunakan sebagai komponen jaringan nirkabel yang memungkinkan alat untuk terhubung ke internet dan mentransmisikan data detak jantung secara *real-time*.
4. Perangkat lunak Cocos2dx dan IDE Android Studio: Android Studio merupakan IDE dengan lingkungan pengembangan terintegrasi resmi untuk platform android sedangkan Cocos2d-x sendiri merupakan sebuah *game engine* yang bersifat *open sources*. Kedua *software* ini memungkinkan desain antarmuka dan visualisasi sinyal PPG secara efektif.

Dengan menetapkan spesifikasi alat yang jelas dan tepat, diharapkan bahwa pengembangan sistem pendeteksi denyut nadi ini dapat berjalan efisien dan sesuai dengan tujuan penelitian. Penentuan spesifikasi ini memandu seleksi komponen dan pengembangan perangkat lunak yang sesuai dengan kebutuhan sistem yang telah ditetapkan.

B. Perancangan Alat

Pada tahap ini, dilakukan perancangan alat yang meliputi perancangan hardware dan software yang diperlukan untuk pengembangan sistem pendeteksi denyut nadi. Bagian hardware maupun software pada dasarnya bekerja secara terintegrasi untuk mendukung fungsionalitas deteksi denyut nadi secara real-time. Bagian hardware bertanggung jawab untuk melakukan deteksi denyut nadi menggunakan sensor yang terhubung dengan mikrokontroler yang kemudian dikirim melalui sinyal Wi-Fi. Sementara itu, bagian software berperan dalam menerima sinyal PPG yang ditransmisikan, menampilkan sinyal secara visual pada perangkat android dan melakukan analisis data untuk menghasilkan informasi vital seperti BPM.

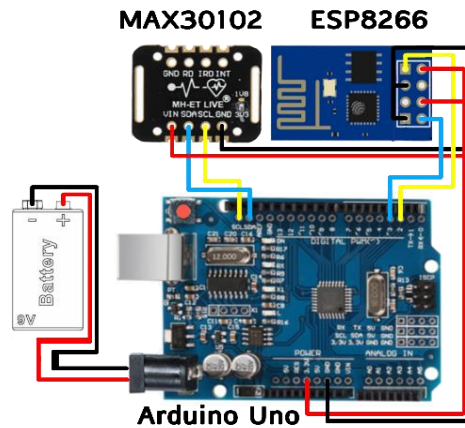
Gambar 3. menunjukkan blok diagram alat yang terdiri dari PPG sensor, mikrokontroler, modul Wi-Fi, dan Android. Diagram ini menggambarkan arsitektur sistem yang digunakan untuk mengumpulkan, mentransmisikan, dan menganalisis data sinyal PPG secara real-time. PPG sensor berfungsi sebagai input untuk sinyal PPG, mikrokontroler bertugas sebagai pengendali dan penghubung untuk data yang diterima dengan modul Wi-Fi, dan modul Wi-Fi digunakan untuk mentransfer data. Android berperan sebagai antarmuka pengguna akhir dan pengolah akhir dari sistem alat ini.



Gambar 3. Blok Diagram Alat

1. Perancangan Hardware

Perancangan *hardware* bertujuan untuk mengubah spesifikasi yang telah ditetapkan menjadi desain fisik yang nyata. Gambar 4 merupakan desain fisik *hardware* meliputi integrasi modul elektronika maupun tata letak komponen yang diperlukan. Bahan dan alat yang digunakan dalam perancangan *hardware* alat ini adalah sensor PPG yaitu MAX30102, mikrokontroler Arduino Uno dan Modul Wifi ESP8266. MAX30102 adalah modul sensor utama kemampuan sensitivitas tinggi dan operasional yang luas. Platform perangkat keras pemroses sinyal yang digunakan adalah mikrokontroler Arduino Uno yang nantinya bertanggung jawab memproses data dari sensor kemudian mentransmisikan data tersebut melalui modul Wi-Fi. Terakhir adalah modul Wi-Fi ESP8266 sebagai komponen jaringan nirkabel yang memungkinkan alat untuk terhubung ke internet dan mentransmisikan data detak jantung secara *real-time*.



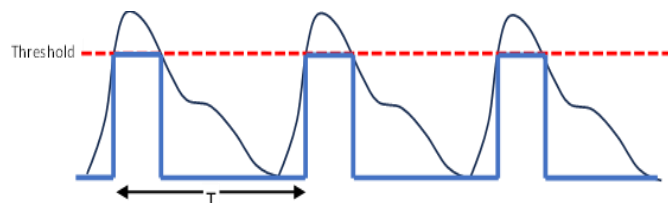
Gambar 4. Pengkabelan Rangkaian *Hardware*

2. *Perancangan Software*

Perancangan *software* bertujuan untuk mengembangkan kode dan algoritma yang diperlukan untuk mengoperasikan perangkat keras serta membuat antarmuka pengguna yang mudah digunakan. Langkah-langkah yang dilakukan dalam perancangan *software* meliputi:

1. Mengembangkan kode dan algoritma: Kode program dan algoritma dibuat untuk mengontrol operasi perangkat keras, termasuk pengambilan data dari sensor, pemrosesan sinyal, dan pengiriman data melalui jaringan nirkabel.
2. Membuat antarmuka pengguna yang mudah digunakan: Antarmuka pengguna yang intuitif dan mudah digunakan dikembangkan untuk memudahkan penggunaan alat pendeteksi denyut nadi. Antarmuka ini mencakup tampilan sinyal PPG, kontrol operasional, dan visualisasi data detak jantung yang diukur.

Gambar 5 menunjukkan perhitungan BPM menjadi salah satu fitur utama yang terintegrasi dalam perangkat lunak. Ini memungkinkan pengguna untuk memantau detak jantung mereka secara akurat dan *real-time* menggunakan alat yang telah dirancang. Penghitungan detak jantung (BPM) melibatkan penetapan nilai ambang batas dimana ketika sinyal PPG (*photoplethysmography*) melewati ambang batas ini, ia menghasilkan sinyal logika tinggi, sebaliknya jika sinyal berada di bawah ambang batas, maka akan dihasilkan sinyal logika rendah. Proses ini menghasilkan pulsa dengan periode tertentu.



Gambar 5. Pembentukan Pulsa dari Sinyal PPG

Untuk menghitung periode pulsa tersebut, program akan mencatat waktu antara setiap perubahan dari sinyal rendah (*low*) ke tinggi (*high*). Setelah periode didapatkan, nilai BPM dihitung menggunakan persamaan 1:

$$bpm = \frac{1}{T} \times 60 \quad (1)$$

Sepuluh data terakhir dari periode ini akan disimpan untuk kemudian digunakan dalam perhitungan rata-rata BPM-nya. Pengambilan sepuluh data terakhir dari periode ini bertujuan untuk mengurangi fluktuasi yang mungkin terjadi dalam data dan memberikan perkiraan yang lebih stabil dari detak jantung. Dengan

menggunakan nilai rata-rata dari sepuluh data terakhir (T_{rerata}), nilai BPM rata-rata kemudian dihitung menggunakan rumus umum nilai rata-rata. Pendekatan ini memungkinkan untuk mendapatkan estimasi yang lebih akurat dari detak jantung berdasarkan data PPG yang terkumpul, serta mencerminkan praktik umum dalam pengukuran BPM menggunakan metode PPG.

$$T_{rerata} = \frac{\sum_{i=1}^{10} T_i}{10} \quad (2)$$

$$BPM_{rerata} = \frac{1}{T_{rerata}} \times 60 \quad (3)$$

Persamaan 2 dicari T_{rerata} adalah nilai rata-rata dari sepuluh periode sinyal PPG, T_i adalah periode dari sinyal PPG untuk setiap sampel yang digunakan dalam perhitungan. Persamaan 3 adalah BPM_{rerata} merupakan nilai BPM rata-rata yang dihasilkan. Pendekatan ini membantu memperoleh estimasi yang lebih stabil dan akurat terhadap detak jantung berdasarkan data yang diukur menggunakan metode PPG, memungkinkan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi data yang mungkin terjadi.

Persamaan 3 menyatakan sepuluh data periode terakhir ini akan dipresentasikan/ditampilkan kepada pengguna untuk memungkinkan evaluasi keteraturan irama detak jantung. Tujuannya adalah untuk menentukan apakah irama detak jantung konsisten atau tidak. Dengan memeriksa data periode secara berurutan, pengguna dapat mengidentifikasi adanya ketidakteraturan dalam detak jantung, yang mungkin menandakan keberadaan aritmia atau gangguan irama jantung lainnya. Ini menjadi parameter penting selain detak jantung yang berubah cepat atau lambat. Menyajikan informasi ini memungkinkan pengguna untuk lebih memahami kondisi jantung mereka dan mengambil langkah-langkah yang sesuai sesuai kebutuhan medis atau kesehatan.

Persamaan 4 adalah menghitung standar deviasi dari sepuluh data periode detak jantung ini juga memberikan wawasan yang berharga tentang kestabilan irama detak jantung. Standar deviasi merupakan ukuran sebaran data yang menunjukkan seberapa jauh setiap nilai data dari rata-ratanya. Saat standar deviasi rendah, menunjukkan bahwa data periode detak jantung cenderung berkumpul dekat dengan nilai rata-ratanya, mengindikasikan irama yang stabil. Namun, jika standar deviasi tinggi, itu menunjukkan adanya variasi yang signifikan antara data periode, yang mungkin menandakan ketidakstabilan irama detak jantung atau fluktuasi yang signifikan dalam interval detak. Dengan demikian, pengukuran standar deviasi memberikan perspektif tambahan tentang kondisi irama detak jantung yang krusial untuk evaluasi terhadap kesehatan jantung seseorang. Standar deviasi dihitung dengan rumus:

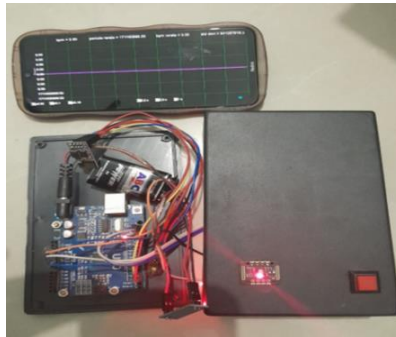
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{rerata})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

Dimana n adalah jumlah data periode sinyal PPG yang digunakan, dalam kasus ini $n = 10$. Standar deviasi membantu dalam mengevaluasi stabilitas irama detak jantung berdasarkan variasi data periode detak yang terukur.

Antarmuka pengguna dirancang untuk menampilkan informasi vital secara intuitif dan mudah dipahami. Tampilan sinyal PPG diproyeksikan dengan jelas, memungkinkan pengguna untuk memantau perubahan volume darah dengan detail. Selain itu, informasi tentang BPM, BPM rerata, periode sinyal, dan standar deviasi disajikan dengan jelas dalam antarmuka pengguna. Fitur-fitur ini dirancang untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang kesehatan jantung pengguna dengan visualisasi yang informatif. Visualisasi sinyal PPG dan metrik kesehatan jantung yang disajikan dengan jelas diharapkan dapat membantu pengguna memahami kondisi Kesehatan jantung mereka dengan lebih baik dan memantau perkembangannya.

Fitur penting lainnya yang dirancang adalah penskalaan pada sumbu horizontal dan vertikal. Hal ini memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan tampilan sinyal PPG sesuai dengan preferensi dan

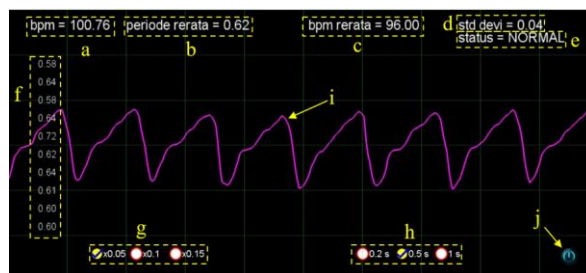
kebutuhan. Dengan penskalaan sumbu horizontal, pengguna dapat mengatur skala waktu untuk memperbesar atau memperkecil jangkauan waktu yang ditampilkan dalam grafik, sehingga memungkinkan mereka untuk melihat detail detak jantung dalam berbagai rentang waktu. Di sisi lain, penskalaan pada sumbu vertikal memungkinkan pengguna untuk memperluas atau mempersempit rentang sinyal secara vertikal yang direpresentasikan dalam tampilan grafik. Hal ini memungkinkan pengguna untuk menangkap perubahan sinyal PPG dengan lebih detail. Dengan fitur penskalaan ini, aplikasi menjadi lebih fleksibel dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna, sehingga meningkatkan efektivitas dan kegunaannya dalam memantau detak jantung secara *real-time*.



Gambar 6. Bentuk Fisik Prototype PPG

Dalam Gambar 6. dapat dijelaskan langkah-langkah penggunaan alat dan pengoperasian aplikasi untuk memudahkan pengguna dalam memanfaatkan *prototype* dengan baik:

1. Menyalakan Alat: Tekan tombol Power yang terletak pada bagian atas alat untuk menyalakan perangkat.
2. Koneksi ke Perangkat Android: Pada perangkat Android, buka pengaturan Wi-Fi dan pilih sinyal Wi-Fi yang disediakan oleh alat.
3. Mengakses Aplikasi PPG: Buka aplikasi PPG yang telah diinstal pada perangkat Android dan pastikan status koneksi sudah terhubung antara *prototype* dengan android.
4. Menggunakan Sensor: Tempelkan ujung jari telunjuk pada sensor yang terletak di bagian atas alat dan tunggu beberapa detik hingga pembacaan sinyal stabil dan data mulai muncul di aplikasi.
5. Membaca Data Real-Time: Grafik real-time dari sinyal PPG akan ditampilkan di bagian tengah layar aplikasi dan perhatikan perubahan pola gelombang serta angka-angka yang menunjukkan informasi dari detak jantung.
6. Mengatur Preferensi Aplikasi: Aplikasi dilengkapi dengan fitur penskalaan horizontal dan vertikal yang memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan tampilan grafik real-time sesuai keinginan. Pengguna dapat memperbesar atau memperkecil tampilan untuk melihat detail yang lebih spesifik atau gambaran umum dari sinyal PPG.
7. Notifikasi Gangguan Detak Jantung: Aplikasi dilengkapi dengan informasi status detak jantung berdasarkan BPM rata-rata yang dikategorikan menjadi cepat, lambat atau normal.



Gambar 7. Antarmuka Aplikasi yang Dikembangkan

Berikut adalah keterangan dari Gambar 7. yang menyatakan *UI (User Interface)* dan beberapa informasi yang terdapat didalamnya:

1. Nilai BPM (a): Menampilkan jumlah *Beats Per Minute* secara real-time. Ini adalah nilai yang menunjukkan detak jantung per menit.
2. Periode Rata-rata Sinyal (b): Menunjukkan rata-rata waktu antar detak jantung, memberikan pengguna informasi tentang konsistensi detak jantung mereka.
3. Nilai BPM Rata-rata (c): Menampilkan rata-rata BPM yang dihitung selama periode pengukuran, membantu pengguna memahami tren detak jantung mereka.
4. Standar Deviasi Periode Sinyal PPG (d): Menghitung dan menampilkan standar deviasi dari periode sinyal PPG, memberikan gambaran tentang variasi dalam detak jantung.
5. Status Laju Denyut Nadi (e): Menampilkan status detak jantung berdasarkan BPM rata-rata dengan status: Lambat jika BPM rata-rata kurang dari 60, Normal jika BPM rata-rata antara 60 hingga 100 dan Cepat jika BPM rata-rata lebih dari 100.
6. 10 Periode Terakhir Secara Berurutan (f): Menampilkan daftar 10 periode terakhir detak jantung, memberikan pengguna detail tentang detak jantung mereka dalam beberapa waktu terakhir.
7. Pengaturan Skala Vertikal (g): Memungkinkan pengguna untuk mengatur skala vertikal pada grafik PPG, memperbesar atau memperkecil tampilan sinyal untuk melihat detail yang diinginkan.
8. Pengaturan Skala Horizontal (h): Memungkinkan pengguna untuk mengatur skala horizontal pada grafik PPG, memperbesar atau memperkecil tampilan sinyal untuk melihat detail yang diinginkan.
9. Sinyal PPG (i): Menampilkan grafik real-time dari sinyal PPG, memperlihatkan pola gelombang yang bergerak seiring dengan detak jantung.
10. Tombol Keluar dari Aplikasi (j): Tombol untuk keluar dari aplikasi, memungkinkan pengguna untuk menutup aplikasi dengan mudah.

Sinyal PPG ditampilkan yang ditampilkan dapat digunakan untuk menilai kondisi jantung. Misalkan, pola Sinyal Normal ditandai dengan sinyal PPG yang teratur dan berulang dengan puncak-puncak yang tajam, menunjukkan aliran darah yang sehat dan detak jantung yang teratur. Pola Sinyal Aritmia ditandai dengan sinyal PPG yang tidak teratur atau memiliki interval waktu yang tidak konsisten antara puncak-puncaknya, yang dapat mengindikasikan aritmia, termasuk fibrilasi atrium. Pola Sinyal Tachycardia menunjukkan frekuensi puncak yang lebih tinggi dari normal secara konsisten (BPM lebih dari 100), yang dapat mengindikasikan tachycardia. Pola Sinyal dengan Amplitudo Rendah menunjukkan amplitudo sinyal PPG yang rendah, yang mungkin menunjukkan masalah sirkulasi darah atau aliran darah yang buruk. Analisis pola-pola sinyal ini digunakan untuk memungkinkan deteksi dini gangguan detak jantung dan memberikan informasi penting untuk penilaian kondisi kesehatan jantung.

Dalam penelitian ini, untuk mengevaluasi akurasi dan error sesuai dengan persamaan 5 dari sistem PPG yang dikembangkan, kami menggunakan metode perbandingan antara hasil pembacaan PPG (y_i) dengan hasil pembacaan dari alat standar oximeter (\hat{y}_i) sebagai referensi. Metrik utama yang digunakan untuk mengukur kinerja sistem adalah *Relative Error* (E) dengan persamaan 5:

$$E = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \times 100\% \quad (5)$$

Dengan menghitung *Relative Error*, dapat ditentukan tingkat akurasi sistem PPG dan mengidentifikasi sejauh mana hasil pengukuran sistem PPG mendekati nilai referensi yang dihasilkan oleh alat standar dalam persentase. Hal ini penting untuk memastikan bahwa sistem PPG dapat memberikan pembacaan yang dapat diandalkan dan akurat untuk deteksi dini gangguan detak jantung.

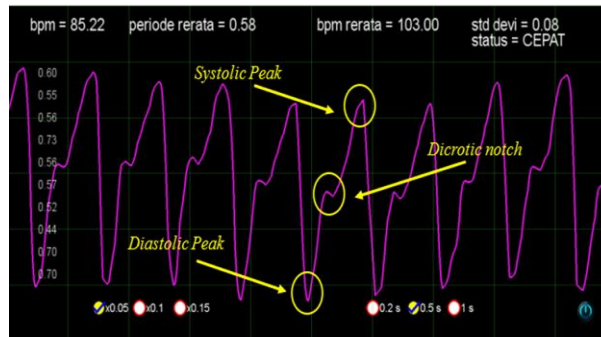
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan serangkaian pengujian untuk memastikan bahwa alat bekerja dengan baik dan sesuai dengan kebutuhan rancangan awal. Pengujian juga dimaksudkan untuk mengevaluasi fungsi maupun kinerja alat. Dalam hal ini dilakukan dua pengujian penting yaitu pengujian fungsionalitas dan pengujian performa alat.

A. Pengujian Fungsionalitas

Pengujian Fungsionalitas mencakup pengujian yang bertujuan untuk memastikan bahwa alat dapat berfungsi sesuai dengan yang diharapkan dan dapat melakukan tugas-tugasnya dengan benar. Misalnya, pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa alat mampu menampilkan sinyal PPG secara konsisten serta menampilkan informasi penting seperti BPM dan standar deviasi. Selain itu dilakukan pengujian fitur penskalaan sinyal PPG apakah telah bekerja sesuai dengan semestinya.

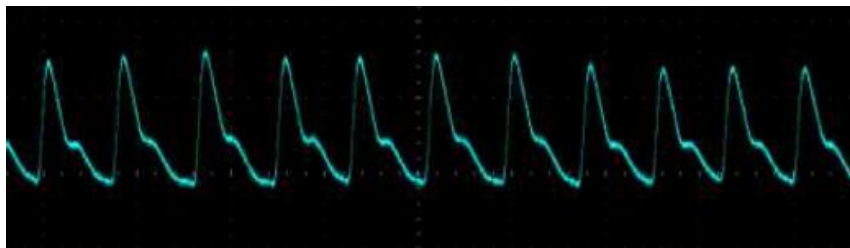
Pengujian awal yang dilakukan bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dasar dari alat, dengan fokus utama pada kemampuannya untuk menampilkan sinyal PPG dan informasi penting seperti BPM dan standar deviasi. Pengujian ini merupakan langkah penting dalam memverifikasi bahwa alat telah berfungsi sesuai dengan yang diharapkan dan siap untuk pengujian lebih lanjut. Berikut adalah sinyal PPG yang dihasilkan:



Gambar 8. Visualisasi Sinyal PPG pada Alat

Gambar 8. menampilkan visualisasi sinyal PPG yang berhasil ditangkap oleh alat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat berfungsi dengan baik, menghasilkan sinyal PPG yang jelas dan stabil. Selain itu, beberapa informasi penting seperti BPM, BPM rerata, sepuluh periode terakhir sinyal PPG, periode rerata, dan standar deviasi juga dapat ditampilkan. Hasil ini mengindikasikan bahwa alat telah mampu memenuhi tujuan fungsionalitasnya dan siap untuk dilakukan pengujian lebih lanjut serta pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan kinerjanya.

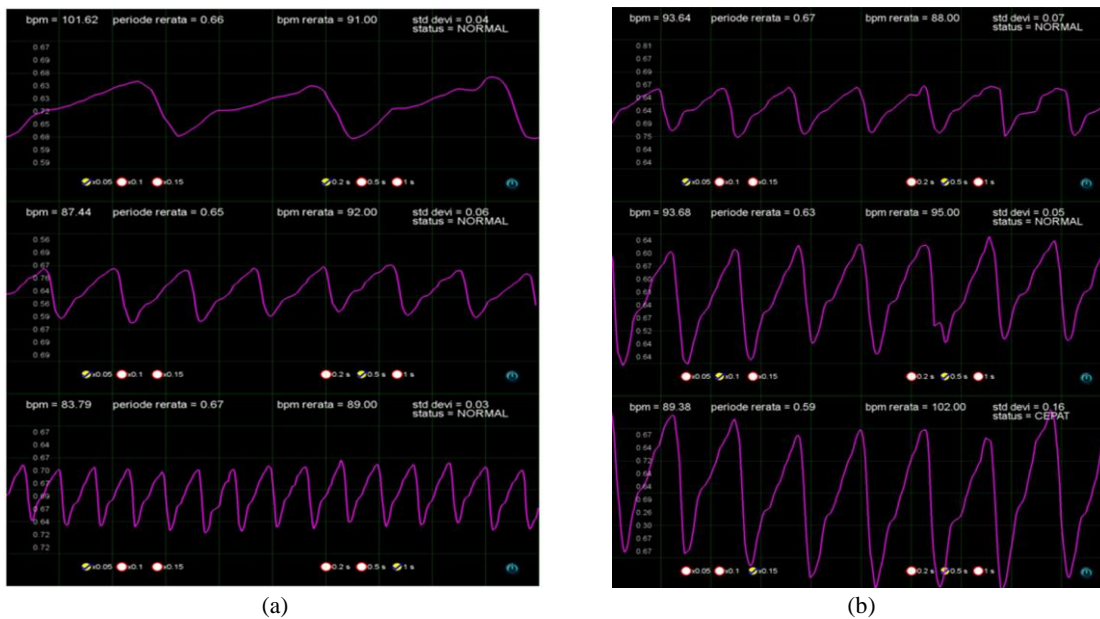
Dalam pengujian ini, sinyal PPG yang dihasilkan oleh Prototype PPG juga akan dianalisis secara komparatif dengan sinyal PPG yang ada dalam literatur terkait. Pemilihan sinyal PPG dari literatur dilakukan dengan memperhatikan kesesuaian karakteristik sinyal. Berikut adalah sinyal PPG pembanding:



Gambar 9. Sinyal PPG Pembanding [12]

Dari Gambar 8. dan Gambar 9. menunjukkan bahwa sinyal PPG yang dihasilkan memiliki kemiripan karakteristik dengan sinyal PPG pembanding. Karakter utama yang diperhatikan adalah adanya *systolic peak*, *dicrotic notch* dan *diastolic peak*. Kesamaan karakteristik ini menunjukkan bahwa *prototype* PPG mampu menghasilkan sinyal PPG yang sesuai dengan standar dan dapat diandalkan untuk aplikasi pemantauan detak jantung. Dari gambar tersebut juga terlihat bahwa kedua gambar tersebut menunjukkan arah pergerakan sinyal yang berbeda. Perbedaan arah ini dapat terjadi karena desain tampilan sinyal pada perangkat yang dikembangkan ditampilkan dengan pergerakan dari kanan ke kiri, berbeda dengan tampilan standar yang bergerak dari kiri ke kanan, seperti yang terlihat pada osiloskop tradisional. Meskipun arah pergerakan sinyal berbeda, informasi yang ditampilkan tetap valid dan dapat diinterpretasikan dengan cara yang sama. Pengguna perlu menyadari bahwa perbedaan arah ini adalah aspek desain visualisasi dan tidak mencerminkan perbedaan dalam data fisiologis yang direkam.

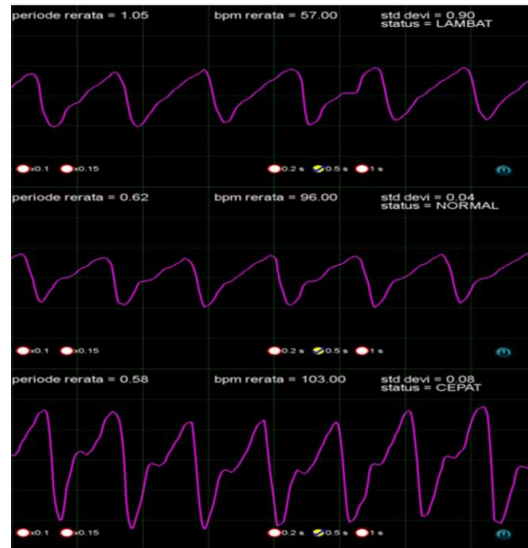
Pengujian fungsionalitas terkait penskalaan sinyal PPG dilakukan untuk memastikan bahwa alat mampu menyesuaikan skala sinyal PPG dengan baik. Hal ini penting agar pengguna dapat melihat sinyal PPG dengan jelas dan sesuai dengan preferensi mereka. Berikut adalah hasil pengujian fitur penskalaan alat:



Gambar 10. (a) Penskalaan Sinyal Secara Horizontal (b) Penskalaan Sinyal Secara Vertikal

Dalam Gambar 10. terlihat visualisasi yang menggambarkan efektivitas fitur penskalaan pada alat. Pengujian ini menunjukkan bahwa alat dapat menyesuaikan skala sinyal PPG secara proporsional baik secara vertikal maupun horizontal. Dengan adanya fitur penskalaan yang berfungsi dengan baik, pengguna dapat dengan mudah mengatur tampilan sinyal PPG sesuai dengan preferensi mereka, memungkinkan analisis yang lebih baik terhadap data yang ditampilkan. Hal ini mengindikasikan bahwa fitur penskalaan telah berjalan dengan baik dan memenuhi kebutuhan fungsionalitas alat secara efektif.

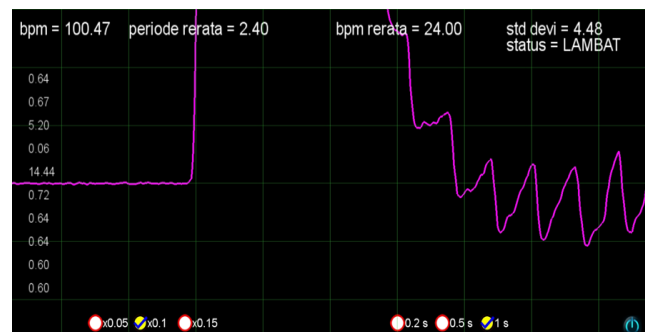
Pengujian fungsionalitas terkait pengkategorian laju denyut nadi juga telah dilakukan. Alat yang dirancang diuji untuk menentukan laju denyut nadi sebagai indikator krusial dalam kesehatan jantung. Gambar 11. Laju denyut nadi dikelompokkan ke dalam tiga kategori: cepat jika nilai rata-rata BPM melebihi 100, lambat jika nilai rata-rata BPM kurang dari 60, dan normal jika nilai rata-rata BPM berada di antara 60 dan 100. Pengkategorian ini memungkinkan evaluasi yang lebih rinci tentang kondisi jantung pengguna. Dengan demikian, alat ini tidak hanya mampu memantau bentuk sinyal PPG, tetapi juga memberikan informasi penting tentang laju denyut nadi pengguna, memungkinkan intervensi lebih lanjut sesuai dengan kebutuhan medis mereka.



Gambar 11. Klasifikasi Laju Denyut Nadi Berdasarkan BPM Rata-Rata

B. Pengujian Performa

Pengujian Performa melakukan pengujian untuk mengevaluasi performa deteksi detak jantung. Ini termasuk mengukur keakuratan deteksi detak jantung, kecepatan respons sistem terhadap perubahan detak, dan ketepatan dalam mengukur nilai BPM.



Gambar 12. Respon Waktu Alat Terhadap Masukan Sensor

Gambar 12. menunjukkan tangkapan visual terhadap respon waktu terhadap masukan sensor. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengukur waktu respon sejak jari ditempatkan pada sensor hingga terciptanya sinyal PPG yang stabil. Hal ini merupakan langkah penting untuk mengevaluasi kinerja alat dalam merespons masukan dari pengguna. Dari pengujian yang dilakukan mengungkapkan bahwa alat yang dikembangkan memerlukan waktu 4.07 detik untuk mendapatkan sinyal yang diharapkan. Temuan ini memberikan gambaran awal tentang waktu yang dibutuhkan oleh alat sebelum dapat memberikan bentuk sinyal yang valid.

Selanjutnya, setelah sinyal PPG yang stabil terbentuk, pengukuran dilakukan untuk menentukan nilai BPM yang stabil. Dalam pengujian ini, dicatat waktu yang diperlukan alat untuk memberikan nilai BPM yang stabil adalah mencapai sekitar 5.92 detik dan memerlukan waktu 11.49 detik untuk mendapatkan nilai BPM rerata. Hasil ini memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang konsistensi respons alat dalam menghasilkan informasi penting terkait detak jantung.

Selanjutnya, setelah sinyal PPG yang stabil terbentuk, pengukuran dilakukan untuk menentukan nilai BPM yang stabil semenjak jari ditempatkan di atas sensor. Dalam pengujian ini, dicatat waktu yang diperlukan alat untuk memberikan nilai BPM yang stabil adalah sekitar 5,92 detik. Cara yang serupa juga dilakukan untuk mendapatkan nilai BPM rata-rata, dan dari pengujian mencatat bahwa waktu yang diperlukan adalah 11,49 detik. Hasil ini memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang konsistensi

respons alat dalam menghasilkan informasi penting terkait detak jantung, menunjukkan bahwa alat yang dikembangkan mampu memberikan sinyal dan nilai BPM yang stabil dalam waktu yang relatif cepat.

Dalam rangka menilai kemampuan *real-time* dari alat deteksi detak jantung ini, serangkaian pengujian yang terfokus pada respons alat terhadap perubahan input secara dinamis juga dilakukan. Dalam pengujian ini, diberikan gangguan pada masukan sensor dengan cara mengangkat jari dan mengembalikannya ke posisi semula secara cepat. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa perubahan input mengakibatkan perubahan bentuk sinyal secara *real-time* pada alat. Dari pengamatan, waktu yang diperlukan dari saat perubahan sinyal terjadi hingga kembali stabil adalah sekitar 3,27 detik. Nilai ini mencerminkan waktu respons alat terhadap perubahan input yang dilakukan, menunjukkan lamanya proses yang dibutuhkan alat untuk mengenali dan menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi. Waktu respon yang tercatat merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kemampuan *real-time* dari alat yang dikembangkan. Gambar 13. Menunjukkan tangkapan visual terkait respon alat terhadap perubahan masukan.



Gambar 13. Respon Terhadap Perubahan Masukan Sensor

Pengujian perbandingan nilai BPM antara *prototype* PPG yang dikembangkan dan alat standar oximeter merupakan tahap krusial dalam validasi keakuratan deteksi detak jantung. Hasil pengukuran BPM (*Beat Per Minute*) ini merupakan parameter kunci dalam mengevaluasi kinerja alat deteksi detak jantung. BPM yang dihitung oleh alat adalah hasil dari pengolahan sinyal PPG yang diterima oleh sensor. Oleh karena itu, keakuratan nilai BPM tersebut mencerminkan keakuratan dalam proses pengolahan sinyal PPG yang dilakukan oleh algoritma perangkat lunak. Selain BPM, perhitungan lain seperti periode dan standar deviasi juga bergantung pada kualitas sinyal PPG yang diterima oleh alat. Dengan demikian, akurasi nilai BPM tidak hanya menunjukkan akurasi pengukuran detak jantung, tetapi juga mencerminkan akurasi dari proses pengolahan sinyal PPG secara keseluruhan. Berikut adalah hasil pengujian pengukuran BPM:

Table 1. Hasil Pengujian Pengukuran BPM

| Pengujian ke- | Prototype | | $BPM_{oximeter}$ | Error (%) | |
|---------------|-----------|----------------|------------------|-----------|----------------|
| | BPM | BPM_{rerata} | | BPM | BPM_{rerata} |
| 1 | 93 | 91 | 94 | 1.06 % | 3.19 % |
| 2 | 97 | 95 | 98 | 1.02 % | 3.06 % |
| 3 | 96 | 93 | 90 | 6.66 % | 3.33 % |
| 4 | 94 | 91 | 93 | 1.07 % | 2.15 % |
| 5 | 97 | 95 | 99 | 2.02 % | 4.04 % |
| 6 | 95 | 93 | 92 | 3.26 % | 1.09 % |
| 7 | 92 | 89 | 90 | 2.22 % | 1.11 % |
| 8 | 91 | 95 | 96 | 5.20 % | 1.04 % |
| 9 | 90 | 93 | 93 | 3.22 % | 0 % |
| 10 | 86 | 91 | 89 | 3.37 % | 2.25 % |
| Rata-rata | | | | 2.91% | 2.13% |

Dari hasil pengukuran Tabel 1, terungkap bahwa terdapat *error* sebesar 2.91% pada nilai BPM dan 2.13% untuk BPM_{rerata} yang dihasilkan oleh *prototype* alat deteksi detak jantung dengan BPM referensi oximeter. Hal ini menunjukkan nilai BPM_{rerata} memiliki nilai yang lebih akurat tetapi seperti yang

ditunjukkan pada hasil pengujian sebelumnya bahwa BPM_{rerata} memiliki waktu tunggu yang lebih lama dibandingkan nilai BPM.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah prototype alat deteksi detak jantung dengan pengujian performa menunjukkan bahwa alat ini mampu menghasilkan sinyal PPG yang stabil dalam waktu sekitar 4.07 detik setelah jari ditempatkan pada sensor. Respon alat terhadap perubahan input juga cepat, dengan waktu stabilisasi sinyal sekitar 3.27 detik setelah terjadi gangguan. Dalam hal keakuratan deteksi detak jantung, alat ini menunjukkan error sebesar 2.91% untuk nilai BPM dan 2.13% untuk nilai BPM rata-rata dibandingkan dengan oximeter standar. Meskipun terdapat sedikit error, hasil ini menunjukkan bahwa alat memiliki akurasi yang baik dalam mengukur detak jantung. Selain itu, waktu yang dibutuhkan alat untuk mendapatkan nilai BPM yang stabil adalah sekitar 5.92 detik, sementara untuk mendapatkan nilai BPM rata-rata diperlukan waktu sekitar 11.49 detik.

REFERENSI

- [1] D. Castaneda, A. Esparza, M. Ghamari, C. Soltanpur, and H. Nazeran, "A review on wearable photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care," *Int. J. Biosens. Bioelectron.*, vol. 4, no. 4, pp. 195–202, 2018, doi: 10.15406/ijbsbe.2018.04.00125.
- [2] H. W. Loh, S. Xu, O. Faust, C. P. Ooi, P. D. Barua, S. Chakraborty, R. S. Tan, F. Molinari, U. R. Acharya, "Application of photoplethysmography signals for healthcare systems: An in-depth review," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 216, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1016/j.cmpb.2022.106677.
- [3] S. Kim, X. Xiao, and J. Chen, "Advances in Photoplethysmography for Personalized Cardiovascular Monitoring," *Biosensors*, vol. 12, no. 10, pp. 10–13, 2022, doi: 10.3390/bios12100863.
- [4] M. A. Almarshad, S. Islam, and S. Al-ahmadi, "Diagnostic Features and Potential Applications of PPG Signal in Healthcare : A Systematic Review," *Healthcare*, vol. 10, pp. 1–28, 2022.
- [5] M. Elgendi, R. R. Fletcher, Y. Liang, N. Howard, N. H. Lovell, D. Abbott, K. Lim and R. Ward, "The use of photoplethysmography for assessing hypertension," *NPJ Digital Medicine*, vol. 2, p. 60, Jun. 2019, doi: 10.1038/s41746-019-0136-7.
- [6] D. K. Widjaja, A. A. Setiawan, and Ariosta, "Gambaran Gangguan Irama Jantung Yang Disebabkan Karena Hipertiroid," *Diponegoro Med. J. (Jurnal Kedokt. Diponegoro)*, vol. 6, no. 2, pp. 434–442, 2017.
- [7] Z. Liu, B. Zhou, Z. Jiang, X. C. BE, Y. Li, M. Tang, F. Miao, "Multiclass Arrhythmia Detection and Classification From Photoplethysmography Signals Using a Deep Convolutional Neural Network," *J. Am. Heart Assoc.*, vol. 11, no. 7, p. e023555, Apr. 2022, doi: 10.1161/JAHA.121.023555.
- [8] E. Sulistyono, "Alat Pendeteksi Denyut Nadi Berbasis Arduino yang Diintegrasikan ke Komputer," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta 2016*, 2016. [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/691/622>
- [9] M. Muthmainnah and D. B. Tabriawan, "Prototipe Alat Ukur Detak Jantung Menggunakan Sensor MAX30102 Berbasis Internet of Things (IoT) ESP8266 dan Blynk," *JISKA (Jurnal Inform. Sunan Kalijaga)*, vol. 7, no. 3, pp. 163–176, 2022, doi: 10.14421/jiska.2022.7.3.163-176.
- [10] H. H. Rachmat and D. R. Ambaransari, "Sistem Perekam Detak Jantung Berbasis Pulse Heart Rate Sensor pada Jari Tangan," *ELKOMIKA*, vol. 6, no. 3, p. 344, 2018, doi: 10.26760/elkomika.v6i3.344.
- [11] R. S. Kusuma, M. Pamungkasty, F. S. Akbaruddin, and U. Fadlilah, "Prototipe Alat Monitoring Kesehatan Jantung berbasis IoT," *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 18, no. 2, pp. 59–63, 2018, doi: 10.23917/emitor.v18i2.6353.
- [12] C. A. Pratiwi, P. Madona, and Yusmar Palapa Wijaya, "Akuisisi Data Sinyal Photoplethysmograph (PPG) Menggunakan Photodiode," *ELEMENTER*, vol. 2, no. 2, pp. 33–42, 2016, doi: 10.35143/elementer.v2i2.187.
- [13] A. Maliki and J. Utama, "Alat Pemantau Detak Jantung dan Pernafasan dengan Sistem Mikrokontroler," *Telekontran*, vol. 6, no. 2, pp. 58–67, 2018.
- [14] R. Yulian, "Rancang Bangun Photoplethysmography (PPG) Tipe Gelang Tangan untuk Menghitung Detak Jantung Berbasis Arduino yang," *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 3, 2017.
- [15] N. Nuryani, M. F. Akshya, and N. Wiyono, "Sistem Pengukuran Detak Jantung Menggunakan Arduino dan Android Berbasis Fotoplethysmogram," *Indones. J. Appl. Phys.*, vol. 13, no. 1, p. 147, 2023, doi: 10.13057/ijap.v13i1.73636.