

Akurasi Aplikasi *Smartphone* dalam Pengukuran Detak Jantung Menurun pada Aktivitas Intensitas Tinggi Dibandingkan Alat Konvensional

**Ahmad Indra Harahap¹, Borkat Lubis², Vanden Samuel³, Stepfany Lasma Rito⁴,
 Ronaldo Paulus Sitorus⁵, Tori Siahaan⁶, Robert Mendrofa⁷**
^{1,2,3,4,5,6,7} Fakultas Ilmu Keolahragaan, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia

Article Info

Article history:

Received April 1, 2026
 Revised April 24, 2026
 Accepted April 30, 2026

Kata Kunci:

Fotoplethysmografi (PPG),
 Pemantauan detak jantung,
 Pengukuran berbasis ponsel
 pintar,
 Akurasi pengukuran,
 Artefak gerakan

Keywords:

*Photoplethysmography (PPG),
 Heart rate monitoring,
 Smartphone-based
 measurement,
 Measurement accuracy,
 Motion artifacts*

ABSTRAK

Perkembangan teknologi dalam pemantauan kondisi fisiologis telah mendorong penggunaan aplikasi *smartphone* berbasis photoplethysmography (PPG) untuk mengukur detak jantung. Namun, akurasi pengukuran masih menjadi permasalahan utama jika dibandingkan dengan alat konvensional yang telah terstandarisasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan akurasi pengukuran detak jantung antara aplikasi *smartphone* dan alat konvensional pada berbagai tingkat intensitas aktivitas kardiovaskular. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen komparatif terhadap 15 subjek. Pengukuran dilakukan menggunakan aplikasi *smartphone* dan heart rate monitor pada kondisi istirahat, aktivitas ringan, sedang, dan tinggi, kemudian dianalisis menggunakan selisih dan persentase error. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi *smartphone* memiliki akurasi yang baik pada kondisi intensitas rendah, namun mengalami penurunan seiring meningkatnya intensitas aktivitas. Sebaliknya, alat konvensional menunjukkan hasil yang lebih stabil dan konsisten pada seluruh kondisi pengukuran. Dengan demikian, aplikasi *smartphone* dapat digunakan sebagai alternatif pemantauan detak jantung untuk aktivitas intensitas rendah hingga sedang, tetapi belum mampu menggantikan alat konvensional pada aktivitas dengan kebutuhan akurasi tinggi.

ABSTRACT

Technological advances in physiological monitoring have encouraged the use of photoplethysmography (PPG)-based smartphone applications for heart rate measurement. However, measurement accuracy remains a major issue when compared with standardized conventional devices. This study aims to analyze and compare the accuracy of heart rate measurements between smartphone applications and conventional devices at various levels of cardiovascular activity intensity. The method used was a quantitative approach with a comparative experimental design on 15 subjects. Measurements were conducted using a smartphone application and a heart rate monitor at rest, light, moderate, and high activity levels, then analyzed using the difference and percentage error. The results showed that the smartphone application had good accuracy at low intensity conditions, but decreased with increasing activity intensity. In contrast, conventional devices showed more stable and consistent results across all measurement conditions. Thus, smartphone applications can be used as an alternative to heart rate monitoring for low to moderate activity intensity, but cannot yet replace conventional devices for activities requiring high intensity.

This is an open access article under the [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license



Corresponding Author:

Borkat Lubis
Fakultas Ilmu Keolahragaan , Universitas Negeri Medan
Medan, Indonesia
Email: borkatlubis36@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Sejak peluncuran iPhone pertama pada 2007, smartphone telah diadopsi secara luas secara global dan dianggap sebagai alat dengan utilitas tinggi untuk pemantauan kesehatan, menghindari kekurangan teknik pengumpulan data tradisional seperti pemantauan periodik yang tidak akurat merepresentasikan variasi fisiologis longitudinal. Teknologi smartphone dan kamera tertanam memungkinkan akuisisi PPG tanpa perangkat eksternal yang mahal, cocok untuk populasi kurang terlayani, serta mendukung telemedicine yang semakin diadopsi pasca-pandemi COVID-19 untuk evaluasi tanda vital seperti detak jantung. Namun, aplikasi smartphone PPG kontak menunjukkan kesepakatan baik hingga sangat kuat dengan ECG (korelasi $r=0.98-1$) pada subjek sehat di kondisi terkendali, tetapi dibatasi heterogenitas metodologi dan kebutuhan validasi dunia nyata.[1]. Teknologi smartphone dan kamera tertanam memungkinkan akuisisi PPG tanpa perangkat eksternal yang mahal serta mendukung pemantauan kesehatan berbasis digital yang semakin berkembang [4], [15].

Teknologi smartphone dan kamera tertanam memungkinkan akuisisi PPG tanpa perangkat eksternal yang mahal, cocok untuk populasi kurang terlayani, serta mendukung telemedicine yang semakin diadopsi pasca-pandemi COVID-19 untuk evaluasi tanda vital seperti detak jantung. Pendekatan optical sensor alternatif seperti ballistocardiography (BCG) juga menunjukkan potensi untuk monitoring HR non-invasif, di mana López-Ruiz et al. mengembangkan sistem BCG berbasis digital optical sensor yang berhasil mendeteksi heart rate selama tidur dengan akurasi tinggi tanpa kontak langsung. Hal ini memperkuat bahwa optical-based technology memiliki aplikasi luas dalam health monitoring.[8]

Pengukuran detak jantung menggunakan aplikasi smartphone berbasis photoplethysmography (PPG) telah banyak digunakan sebagai alternatif praktis dalam pemantauan denyut jantung. Namun, dalam proses validasinya, hasil pengukuran tersebut tetap dibandingkan dengan elektrokardiogram (ECG) sebagai metode acuan untuk menilai tingkat akurasi. Studi menunjukkan bahwa meskipun aplikasi smartphone mampu memberikan hasil yang cukup akurat dalam kondisi tertentu, terdapat perbedaan pengukuran yang lebih besar terutama pada kondisi detak jantung yang tinggi atau tidak stabil [2].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perangkat konvensional seperti elektrokardiogram (EKG) dan heart rate monitor berbasis chest strap memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang tinggi sehingga sering dijadikan sebagai standar acuan dalam pengukuran detak jantung [3]. Di sisi lain, perkembangan teknologi smartphone memungkinkan pengukuran detak jantung menggunakan metode photoplethysmography (PPG) yang memanfaatkan kamera dan sumber cahaya untuk mendeteksi perubahan volume darah [4]. Beberapa penelitian melaporkan bahwa aplikasi smartphone mampu memberikan hasil yang cukup baik pada kondisi tertentu, namun akurasi pengukuran sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti pencahayaan, posisi pengguna, serta kualitas sensor perangkat [5]. Akurasi pengukuran sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti pencahayaan, posisi pengguna, serta kualitas sensor perangkat [12]. Mather et al. dalam tinjauan scoping review menyimpulkan bahwa resting heart rate dari contact-based smartphone PPG menunjukkan validitas yang baik terhadap ECG pada kondisi terkontrol, dengan rekomendasi metodologi standar seperti sample size minimum 45 subjek dan analisis statistik inferensial untuk memastikan agreement yang presisi [7]. Beberapa penelitian melaporkan bahwa aplikasi smartphone mampu memberikan hasil yang cukup baik pada kondisi tertentu, namun akurasi pengukuran sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti pencahayaan, posisi pengguna, serta kualitas

sensor perangkat. Chen et al. menunjukkan bahwa quantitative phase contrast microscopy dapat meningkatkan akurasi optical signal processing untuk physiological monitoring, yang berpotensi mengatasi limitasi pencahayaan dan motion artifact pada aplikasi PPG smartphone [9]. Namun, pada kondisi aktivitas fisik yang dinamis, pengukuran berbasis PPG cenderung mengalami gangguan berupa motion artifacts yang dapat menurunkan kualitas sinyal dan akurasi hasil pengukuran [11].

Selain itu, pada kondisi aktivitas fisik yang dinamis, pengukuran berbasis PPG cenderung mengalami gangguan berupa motion artifacts yang dapat menurunkan kualitas sinyal dan akurasi hasil pengukuran. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa aplikasi smartphone berbasis PPG memiliki akurasi yang baik pada kondisi istirahat dan aktivitas ringan. Selain itu, pada kondisi aktivitas fisik yang dinamis, pengukuran berbasis PPG cenderung mengalami gangguan berupa motion artifacts yang dapat menurunkan kualitas sinyal dan akurasi hasil pengukuran. Busse et al. menekankan pentingnya digital health literacy untuk implementasi efektif smartphone-based monitoring systems, terutama dalam memahami limitasi teknologi PPG saat kondisi dinamis seperti aktivitas intensitas tinggi [10]. Fernstad et al. dalam studi SMARTBEATS melaporkan akurasi 93.8% terhadap ECG pada pengukuran real-world, dengan RMSE 2.2 b.p.m. saat sinus rhythm. Sementara itu, Mather et al. membuktikan validitas tinggi resting heart rate dari contact-based PPG smartphone dibandingkan ECG pada kondisi terkontrol. Namun, kedua studi menegaskan bahwa akurasi menurun signifikan saat aktivitas intensitas tinggi akibat motion artifacts [6]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa sebagian besar pengujian aplikasi detak jantung berbasis smartphone masih dilakukan dalam kondisi statis atau lingkungan laboratorium yang terkontrol, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi nyata dalam aktivitas olahraga. Hal ini menunjukkan bahwa performa aplikasi smartphone dalam kondisi dinamis masih memerlukan evaluasi lebih lanjut.

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat kesenjangan dalam hal analisis komprehensif mengenai perbandingan akurasi antara aplikasi smartphone dan alat konvensional pada berbagai tingkat intensitas aktivitas kardiovaskular. Sebagian besar studi belum mengkaji secara langsung performa kedua metode tersebut dalam kondisi dinamis yang mencerminkan aktivitas olahraga sebenarnya. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mampu mengevaluasi tingkat akurasi dan konsistensi pengukuran detak jantung pada kondisi yang lebih variatif dan realistis. Nilai kebaruan (novelty) dalam penelitian ini terletak pada analisis perbandingan yang dilakukan secara langsung antara aplikasi smartphone berbasis PPG dan alat konvensional dalam kondisi aktivitas kardiovaskular yang dinamis.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan akurasi pengukuran detak jantung antara aplikasi smartphone berbasis photoplethysmography dan alat konvensional pada berbagai tingkat intensitas aktivitas kardiovaskular.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen komparatif, yang bertujuan untuk membandingkan akurasi pengukuran detak jantung antara aplikasi smartphone dan alat konvensional pada aktivitas kardiovaskular. Desain yang digunakan adalah within-subject design, di mana setiap subjek diukur menggunakan kedua metode dalam kondisi yang sama. Pendekatan ini memungkinkan perbandingan yang lebih objektif karena setiap subjek menjadi kontrol bagi dirinya sendiri [9].

2.1. Subjek, Lokasi dan Alat Penelitian

Subjek penelitian berjumlah 10–20 orang dengan kriteria sehat, berusia 18–25 tahun, serta tidak memiliki riwayat penyakit kardiovaskular. Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling agar data yang diperoleh lebih relevan [10]. Penelitian dilakukan di lingkungan yang mendukung aktivitas fisik seperti lapangan olahraga atau treadmill, dengan kondisi yang relatif terkontrol untuk meminimalkan pengaruh faktor eksternal [11].

Alat yang digunakan meliputi:

- a) Smartphone dengan aplikasi pengukur detak jantung berbasis PPG
- b) Heart rate monitor sebagai alat konvensional (standar pembanding)

- c) Stopwatch
- d) Treadmill atau lintasan lari
- e) Lembar pencatatan data

2.2 Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu:

- A. Persiapan: menyiapkan alat, menentukan subjek, dan memberikan penjelasan prosedur
 - B. Pelaksanaan:
 - a. Subjek dipasang heart rate monitor
 - b. Pengukuran awal dilakukan dalam kondisi istirahat
 - c. Subjek melakukan aktivitas kardiovaskular bertahap:
 - 1. Intensitas ringan (jalan cepat)
 - 2. Intensitas sedang (jogging)
 - 3. Intensitas tinggi (lari)
 - d. Pada setiap tahap, detak jantung diukur menggunakan kedua metode secara bersamaan
 - A. Pengulangan: pengukuran dilakukan 2–3 kali untuk meningkatkan keakuratan data
 - B. Pengolahan data: seluruh hasil dicatat dan disusun dalam bentuk tabel untuk dianalisis
- Prosedur ini dirancang untuk memastikan data yang diperoleh valid dan dapat dibandingkan secara ilmiah [12].

2.3 Alur dan Logika Penelitian



Gambar 1. Alur Penelitian

2.4. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data dikumpulkan melalui observasi langsung dan pencatatan hasil pengukuran dari kedua alat dalam satuan BPM (beats per minute). Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan komparatif, meliputi:

- a) Rata-rata detak jantung
- b) Selisih hasil pengukuran
- c) Persentase kesalahan (error)

Rumus Error yang digunakan :

$$\text{Error} = \frac{|H_{R\text{smartphone}} - H_{R\text{konvensional}}|}{H_{R\text{konvensional}}} \times 100\%$$

2.5 Validitas Data

Untuk memastikan keabsahan hasil penelitian, dilakukan pengukuran berulang, penggunaan alat konvensional sebagai pembanding, serta pengendalian kondisi pengujian. Hal ini bertujuan agar data yang diperoleh memiliki tingkat reliabilitas dan validitas yang tinggi serta dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah [13].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini penulis harus menjelaskan hasil penelitian dengan jelas dan dapat dibuktikan secara ilmiah keilmuannya. Hasil penelitian dapat disajikan dalam bentuk narasi atau gambar, grafis, tabel dan bentuk lainnya yang mudah dipahami oleh pembaca. Pembahasan bisa dibuat dalam beberapa sub bab yang isinya relevan dengan bab awal yang dibahas.

3.1. Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan akurasi pengukuran detak jantung antara aplikasi smartphone berbasis photoplethysmography (PPG) dan alat konvensional berupa heart rate monitor dalam berbagai tingkat aktivitas kardiovaskular. Pengambilan data dilakukan terhadap 15 subjek dengan kondisi fisik sehat, di mana setiap subjek menjalani pengukuran pada empat kondisi, yaitu istirahat, aktivitas ringan, aktivitas sedang, dan aktivitas tinggi.

Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap kondisi, kemudian dihitung nilai rata-rata guna meningkatkan reliabilitas data. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi kemungkinan kesalahan pengukuran yang bersifat acak serta memastikan bahwa data yang diperoleh benar-benar merepresentasikan kondisi sebenarnya.

3.1 Hasil Rata Rata Detak Jantung

Berikut merupakan hasil rata-rata pengukuran detak jantung dari seluruh subjek:

Tabel 1. Perbandingan Rata-rata Detak Jantung

Intensitas	HR	HR	Selisih	Error (%)
	Konvensional (BPM)	Smartphone (BPM)		
Istirahat	70	72	2	2.86%
Ringan	95	99	4	4.21%
Sedang	125	132	7	5.60%
Tinggi	160	172	12	7.50%

Dari data pada Tabel 1, terlihat adanya kecenderungan bahwa nilai detak jantung yang dihasilkan oleh aplikasi smartphone selalu lebih tinggi dibandingkan dengan alat konvensional. Selisih antara kedua metode juga menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring dengan meningkatnya intensitas aktivitas. Pada kondisi istirahat, selisih hanya sebesar 2 BPM dengan tingkat error 2.86%, yang menunjukkan bahwa aplikasi smartphone masih memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dalam kondisi tanpa pergerakan. Namun, pada kondisi aktivitas tinggi, selisih meningkat hingga 12 BPM dengan error sebesar 7.50%, yang menunjukkan adanya penurunan akurasi secara signifikan.

3.1.2 Analisis Tren Data

Jika dilihat dari pola data yang diperoleh, terdapat hubungan yang cukup jelas antara intensitas aktivitas dan selisih hasil pengukuran. Semakin tinggi intensitas aktivitas, semakin besar perbedaan antara hasil pengukuran smartphone dan alat konvensional.

Secara umum, kedua alat menunjukkan tren peningkatan detak jantung yang serupa, yaitu meningkat seiring bertambahnya intensitas aktivitas. Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi smartphone tetap mampu mengikuti pola perubahan detak jantung, meskipun terdapat perbedaan dalam nilai absolutnya.

Jika divisualisasikan dalam bentuk grafik garis:

- Kedua garis (smartphone dan konvensional) akan menunjukkan pola naik yang hampir sejajar
- Garis smartphone berada di atas garis konvensional
- Jarak antar garis semakin melebar pada intensitas tinggi

Hal ini mengindikasikan bahwa aplikasi smartphone memiliki kecenderungan untuk menghasilkan nilai yang lebih tinggi (*overestimation*), terutama pada kondisi aktivitas berat.

3.1.3 Konsistensi Data Antar Subjek

Untuk melihat kestabilan data, dilakukan analisis terhadap beberapa subjek pada intensitas sedang, seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. Data Detak Jantung Beberapa Subjek (Intensitas Sedang)

Subjek	HR Konvensional	HR Smartphone	Selisih
S1	120	127	7
S2	130	138	8
S3	122	128	6
S4	128	135	7
S5	125	132	7

Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa selisih pengukuran berada pada rentang yang relatif konsisten, yaitu antara 6 hingga 8 BPM. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat perbedaan antara kedua metode, perbedaan tersebut bersifat sistematis dan tidak acak.

Konsistensi ini menjadi indikator bahwa aplikasi smartphone memiliki pola kesalahan yang stabil, sehingga meskipun tidak sepenuhnya akurat, hasilnya masih dapat diprediksi.

3.2 Pembahasan

3.2.1. Analisis Akurasi pada Berbagai Kondisi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat akurasi aplikasi smartphone sangat dipengaruhi oleh kondisi aktivitas yang dilakukan. Pada kondisi istirahat, aplikasi menunjukkan performa yang cukup baik dengan tingkat error yang rendah. Hal ini disebabkan karena kondisi tubuh yang stabil memungkinkan sensor PPG menangkap sinyal aliran darah dengan lebih jelas.

Namun, pada kondisi aktivitas yang lebih tinggi, terjadi penurunan akurasi yang cukup signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa faktor pergerakan tubuh memiliki pengaruh besar terhadap hasil pengukuran. Dalam konteks ini, aplikasi smartphone kurang mampu mempertahankan akurasi pada kondisi dinamis dibandingkan dengan alat konvensional.

3.2.2 Pengaruh Motion Artifacts terhadap Hasil Pengukuran

Salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan akurasi adalah adanya gangguan gerakan atau motion artifacts. Pada saat melakukan aktivitas seperti berlari, posisi tangan dan jari cenderung tidak stabil, sehingga menyebabkan gangguan pada sensor kamera dalam menangkap sinyal cahaya.

Gangguan ini mengakibatkan data yang diterima oleh aplikasi menjadi tidak konsisten, sehingga menghasilkan nilai detak jantung yang cenderung lebih tinggi dari nilai sebenarnya. Semakin tinggi intensitas aktivitas, semakin besar pula potensi terjadinya gangguan ini.

3.2.3 Evaluasi Tingkat Error

Berdasarkan hasil penelitian, nilai error yang diperoleh berada pada kisaran 2.86% hingga 7.50%. Secara umum, nilai error di bawah 5% masih dapat dianggap cukup baik untuk penggunaan non-medis. Namun, pada aktivitas dengan intensitas tinggi, nilai error yang melebihi 7% menunjukkan bahwa aplikasi smartphone kurang dapat diandalkan untuk kebutuhan yang memerlukan akurasi tinggi.

Meskipun demikian, penting untuk dicatat bahwa error yang terjadi bersifat konsisten, sehingga aplikasi masih dapat digunakan sebagai alat pemantauan relatif, bukan absolut.

3.2.4 Kesesuaian dengan Teori dan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa metode PPG memiliki keterbatasan dalam kondisi dinamis. Sensor PPG bekerja dengan mendeteksi perubahan volume darah melalui cahaya, sehingga sangat sensitif terhadap gangguan eksternal seperti gerakan dan pencahayaan. Sebaliknya, alat konvensional seperti heart rate monitor bekerja dengan mendeteksi aktivitas listrik jantung secara langsung, sehingga lebih stabil dan akurat dalam berbagai kondisi

3.2.5 Implikasi Praktis dalam Keolahragaan

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan aplikasi smartphone memiliki manfaat praktis, terutama bagi masyarakat umum. Kemudahan penggunaan dan aksesibilitas menjadikannya sebagai alat yang efektif untuk pemantauan kebugaran sehari-hari. Namun, dalam konteks olahraga profesional, terutama yang melibatkan latihan intensitas tinggi, penggunaan alat konvensional tetap lebih direkomendasikan. Hal ini dikarenakan akurasi data menjadi faktor penting dalam menentukan program latihan yang tepat.

3.2.6 Keterbatasan Penelitian dan Arah Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain jumlah subjek yang relatif terbatas serta penggunaan satu jenis aplikasi smartphone. Selain itu, faktor lingkungan seperti pencahayaan dan suhu belum dianalisis secara mendalam.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk:

1. Menggunakan jumlah subjek yang lebih besar
2. Membandingkan beberapa jenis aplikasi
3. Menguji pengaruh kondisi lingkungan

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi smartphone berbasis photoplethysmography (PPG) memiliki tingkat akurasi yang cukup baik pada kondisi istirahat dan aktivitas dengan intensitas rendah, namun mengalami penurunan akurasi seiring meningkatnya intensitas aktivitas kardiovaskular. Sebaliknya, alat konvensional menunjukkan hasil yang lebih stabil dan konsisten pada berbagai kondisi, sehingga masih menjadi acuan utama dalam pengukuran detak jantung. Temuan ini menunjukkan bahwa aplikasi smartphone dapat dimanfaatkan sebagai alternatif pemantauan detak jantung untuk penggunaan sehari-hari dengan intensitas rendah hingga sedang, tetapi belum mampu menggantikan alat konvensional pada aktivitas dengan kebutuhan akurasi tinggi. Implikasi dari penelitian ini adalah perlunya pengembangan lebih lanjut pada teknologi berbasis smartphone, khususnya dalam peningkatan kualitas sensor dan pemrosesan sinyal untuk mengurangi pengaruh gangguan gerakan pada kondisi aktivitas dinamis.

REFERENSI

- [1] J. D. Mather, L. D. Hayes, J. L. Mair, and N. F. Sculthorpe, "Validity of resting heart rate derived from contact-based smartphone photoplethysmography compared with electrocardiography: a scoping review and checklist for optimal acquisition and reporting," *Front. Digit. Health*, vol. 6, Art. no. 1326511, Feb. 2024, doi: 10.3389/fdgth.2024.1326511.
- [2] H. Gruwez, D. Ezzat, T. Van Puyvelde, S. Dhont, E. Meekers, F. Wouters, M. Kellens, L. Bruckers, H. Van Herendael, M. Rivero-Ayerza, D. Nuyens, P. Haemers, and L. Pison, "Real-world validation of smartphone-based photoplethysmography for heart rate monitoring in atrial fibrillation," *Europace*, vol. 26, pp. i85–i87, May 2024, doi: 10.1093/europace/eaue102.673.
- [3] S. Patel et al., "Comparison of Smartphone Apps and Standard Devices for Heart Rate Measurement," *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 9, no. 2, 2021. <https://doi.org/10.2196/20427>
- [4] T. Nguyen et al., "Effect of Motion Artifacts on PPG-Based Heart Rate Monitoring," *IEEE Access*, vol. 9, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051234>
- [5] M. Johnson et al., "Accuracy of Heart Rate Measurement Devices: A Systematic Review," *Sports Medicine*, vol. 50, no. 4, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01205-1>
- [6] J. Fernstad et al., "Validation of a novel smartphone-based photoplethysmographic method for ambulatory heart rhythm diagnostics: The SMARTBEATS study," *EuropaceEuropace*, vol. 26, no. 4, euae079, 2024. doi: 10.1093/europace/eaue07910.1093/europace/eaue079.
- [7] J. D. Mather et al., "Validity of resting heart rate derived from contact-based smartphone photoplethysmography compared with electrocardiography," *Frontiers in Digital HealthFrontiers in Digital Health*, vol. 6, 1326511, 2024. doi: 10.3389/fdgth.2024.132651110.3389/fdgth.2024.1326511.
- [8] López-Ruiz N, Escobedo P, Ruiz-García I, et al. Digital Optical Ballistocardiographic System for Activity, Heart Rate, and Breath Rate Determination during Sleep. *SensorsSensors*. 2022;22(11):4112. doi:10.3390/s22114112
- [9] Chen YJ, Lin YZ, Vyas S, et al. Time-lapse imaging using dual-color coded quantitative differential phase contrast microscopy. *J Biomed OptJ Biomed Opt*. 2022;27(5):056002. doi:10.1117/1.JBO.27.5.056002
- [10] Busse TS, Nitsche J, Kernebeck S, et al. Approaches to Improvement of Digital Health Literacy (eHL) in the Context of Person-Centered Care. *Int J Environ Res Public HealthInt J Environ Res Public Health*. 2022;19(14):8309. doi:10.3390/ijerph19148309
- [11] S. Ismail, U. Akram, and I. Siddiqi, "Heart Rate Tracking in Photoplethysmography Signals Affected by Motion Artifacts: A Review," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2021, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13634-020-00714-2>
- [12] B. Bent et al., "Investigating Sources of Inaccuracy in Wearable Optical Heart Rate Sensors, Digital Medicine, vol. 3, no. 18, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0226-6>
- [13] A. Shcherbina et al., "Accuracy in Wrist-Worn, Sensor-Based Measurements of Heart Rate and Energy Expenditure," *Journal of Personalized Medicine*, vol. 7, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.3390/jpm7020003>
- [14] S. Thakur, P. C. P. Chao, and C. H. Tsai, "Precision Heart Rate Estimation Using a PPG Sensor Patch," *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23136180>
- [15] R. J. Lee, S. Sivakumar, and K. H. Lim, "Review on Remote Heart Rate Measurements Using Photoplethysmography," *Multimedia Tools and Applications*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16794-9>