

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Photoplethysmography (PPG)

Photoplethysmography (PPG) merupakan teknik optik non-invasif yang digunakan untuk mendeteksi perubahan volume darah di jaringan mikrovaskular menggunakan cahaya yang dipantulkan atau diteruskan melalui kulit. Sinyal PPG dihasilkan dari variasi absorptansi darah terhadap cahaya dan mencerminkan aktivitas jantung dalam setiap siklus denyut. Teknologi ini banyak digunakan untuk pengukuran denyut jantung dan saturasi oksigen karena kemudahan, efisiensi, serta potensi integrasinya dalam perangkat wearable medis modern (Allen et al., 2022).

Kualitas sinyal PPG sangat dipengaruhi oleh artefak gerakan, posisi sensor, perfusi rendah, serta kondisi fisiologis pengguna. Faktor-faktor ini dapat menurunkan keakuratan pembacaan sinyal dan menyebabkan kesalahan interpretasi fisiologis. Oleh karena itu, tahap pra-pemrosesan sinyal seperti filtrasi adaptif, koreksi baseline, dan eliminasi noise menjadi langkah penting untuk memastikan keandalan fitur yang akan diekstraksi dari sinyal PPG sebelum digunakan dalam analisis lanjutan (Palma et al., 2022).

Seiring perkembangan teknologi, PPG kini digunakan secara luas dalam perangkat wearable untuk pemantauan fisiologis berkelanjutan. Sensor PPG dalam jam tangan pintar dan gelang kebugaran memungkinkan pengukuran parameter kesehatan seperti detak jantung, variabilitas denyut jantung, saturasi oksigen, hingga estimasi tekanan darah secara real-time. Inovasi ini menjadi bagian penting

dari sistem pemantauan kesehatan digital yang mendukung konsep personalized healthcare dan telem (Chandrasekhar et al., 2020).

Penelitian terkini menunjukkan bahwa sinyal PPG tidak hanya mencerminkan aktivitas jantung, tetapi juga mengandung informasi mengenai elastisitas arteri dan kondisi vaskular yang berkaitan dengan tekanan darah. Analisis fitur morfologis dan temporal dari sinyal PPG seperti rasio amplitudo puncak dan interval waktu antar puncak menunjukkan potensi besar dalam estimasi tekanan darah non-invasif. Namun, akurasi model masih perlu ditingkatkan melalui integrasi data multi-sinyal dan algoritma pembelajaran mesin (Zhang et al., 2023).

2.1.1 Sensor PPG MAX30102

Sensor MAX30102 merupakan sensor optik yang digunakan untuk memperoleh sinyal *Photoplethysmography* (PPG) melalui pendeteksian perubahan volume darah pada jaringan tubuh. Sensor ini mengintegrasikan sumber cahaya berupa LED merah dan inframerah (*infrared/IR*), fotodetektor, serta rangkaian pengolahan sinyal dalam satu perangkat. Integrasi komponen tersebut memungkinkan MAX30102 digunakan untuk melakukan akuisisi sinyal fisiologis secara non-invasif dan diterapkan pada berbagai perangkat pemantauan kesehatan.



Gambar 2. 1 Sensor PPG MAX30102

Prinsip kerja MAX30102 didasarkan pada metode optik reflektif. LED pada sensor memancarkan cahaya menuju jaringan tubuh, kemudian sebagian cahaya diserap oleh jaringan dan sebagian lainnya dipantulkan kembali menuju fotodetektor. Intensitas cahaya yang diterima fotodetektor mengalami perubahan seiring dengan perubahan volume darah pada pembuluh darah selama siklus denyut jantung. Perubahan intensitas cahaya tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik dan diproses sebagai sinyal PPG. Dengan demikian, pola perubahan sinyal yang dihasilkan dapat menggambarkan perubahan volume darah perifer yang berlangsung secara periodik mengikuti aktivitas jantung.

MAX30102 dilengkapi dengan beberapa komponen pendukung proses akuisisi sinyal, antara lain pengendali LED, fotodetektor, *analog front-end*, konverter analog-ke-digital (ADC), rangkaian pengurangan pengaruh cahaya lingkungan (*ambient light cancellation*), dan *First-In First-Out* (FIFO) untuk penyimpanan data sementara. Sensor tersebut juga menyediakan pengaturan terhadap arus LED dan frekuensi pengambilan sampel sehingga proses akuisisi dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengukuran. Data hasil pembacaan sensor dikirimkan secara digital melalui antarmuka komunikasi I²C untuk selanjutnya diproses oleh mikrokontroler atau sistem pengolah data.

Penggunaan MAX30102 sebagai perangkat akuisisi PPG juga telah diterapkan pada penelitian terkait pengukuran tekanan darah non-invasif. Tjitra et al., (2024) menggunakan sensor MAX30102 untuk memperoleh sinyal PPG yang kemudian melalui tahap *preprocessing*, deteksi puncak, dan ekstraksi fitur sebelum digunakan

dalam proses prediksi tekanan darah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa MAX30102 dapat dimanfaatkan sebagai sensor PPG dalam sistem pengukuran tekanan darah berbasis sinyal fisiologis.

Sinyal PPG yang diperoleh dari sensor MAX30102 dapat digunakan sebagai data awal dalam analisis karakteristik gelombang denyut. Sinyal tersebut terlebih dahulu melalui tahap pra-pemrosesan untuk mengurangi *noise* dan gangguan yang dapat memengaruhi bentuk gelombang. Selanjutnya, sinyal PPG dapat diturunkan untuk menghasilkan *Second Derivative Photoplethysmography* (APG). Hasil turunan kedua tersebut menghasilkan karakteristik gelombang yang dapat dianalisis melalui puncak a, b, c, d, dan e sebagai dasar dalam proses ekstraksi fitur. Dengan demikian, sensor MAX30102 berperan dalam menyediakan sinyal PPG yang menjadi dasar bagi tahapan pengolahan dan analisis sinyal untuk estimasi tekanan darah.

2.2. Second Derivative Photoplethysmography (APG)

Second Derivative Photoplethysmography (APG) merupakan turunan kedua dari sinyal Photoplethysmography (PPG) yang digunakan untuk menonjolkan perubahan percepatan aliran darah dan karakteristik elastisitas pembuluh arteri. Diferensiasi dua kali terhadap sinyal PPG menghasilkan gelombang APG yang secara khas terdiri atas lima puncak utama, yaitu a, b, c, d, dan e, yang masing-masing merepresentasikan fase fisiologis tertentu dari siklus denyut jantung dan propagasi gelombang nadi. Puncak a merupakan puncak positif pertama yang berhubungan dengan percepatan aliran darah awal akibat kontraksi ventrikel kiri, sedangkan puncak b adalah puncak negatif berikutnya yang mencerminkan refleksi

gelombang tekanan dari arteri perifer dan berkaitan erat dengan kekakuan pembuluh darah. Puncak c muncul sebagai puncak positif kedua yang menggambarkan gelombang refleksi lanjutan dan transisi antara fase sistolik dan diastolik awal, sementara puncak d merupakan puncak negatif yang berhubungan dengan penurunan tekanan pada akhir sistol dan awal diastol. Puncak e adalah puncak positif terakhir yang muncul pada fase diastol dan mencerminkan refleksi gelombang tekanan saat pembuluh darah mengalami relaksasi. Analisis amplitudo dan rasio antar puncak APG, khususnya b/a dan d/a , telah banyak digunakan sebagai indikator fungsi vaskular dan memiliki korelasi dengan tekanan darah sistolik dan diastolik (Elgendi et al., 2024)

Second Derivative Photoplethysmography (APG) merupakan turunan kedua dari sinyal *Photoplethysmography* (PPG) yang digunakan untuk mengamplifikasi perubahan percepatan aliran darah dalam arteri. Dengan proses turunan ini, bentuk gelombang menjadi lebih sensitif terhadap perubahan elastisitas pembuluh darah dan karakteristik hemodinamik. APG banyak digunakan untuk menilai fungsi vaskular karena mampu menampilkan lima puncak utama (a, b, c, d, e) yang menggambarkan fase-fase aktivitas jantung dan refleksi gelombang arteri (Chua et al., 2021).

Setiap puncak pada gelombang APG memiliki makna fisiologis yang spesifik. Puncak a menunjukkan kontraksi ventrikel kiri, puncak b menandakan refleksi gelombang dari arteri perifer, sedangkan puncak c, d, dan e menggambarkan proses distensi dan relaksasi dinding arteri. Rasio antar puncak seperti b/a dan d/a digunakan untuk menilai tingkat kekakuan arteri dan elastisitas vaskular, yang

memiliki hubungan langsung dengan tekanan darah dan penuaan pembuluh darah (Koike et al., 2020).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode APG lebih unggul dibandingkan PPG konvensional dalam mendeteksi perubahan fungsi vaskular. Fitur amplitudo dan interval waktu antar puncak yang diekstraksi dari sinyal APG dapat digunakan untuk memperkirakan tekanan darah sistolik dan diastolik secara akurat. Selain itu, APG juga efektif dalam mendeteksi perubahan akibat usia, aktivitas fisik, maupun gangguan kardiovaskular tertentu yang tidak selalu terdeteksi oleh PPG biasa (Liu et al., 2019).

Dalam pengembangan sistem estimasi tekanan darah non-invasif, APG telah dikombinasikan dengan teknologi machine learning untuk meningkatkan akurasi prediksi. Penggunaan algoritma seperti support vector regression dan deep neural network memungkinkan model mengenali hubungan kompleks antara fitur-fitur APG dan nilai tekanan darah aktual. Pendekatan ini berpotensi menciptakan sistem pemantauan tekanan darah yang lebih adaptif, real-time, dan dapat diterapkan pada perangkat wearable modern (Liang et al., 2022).

2.3. Ekstraksi Fitur Sinyal PPG dan APG

Tekanan darah merupakan parameter fisiologis utama yang mencerminkan kekuatan pompa jantung serta resistansi perifer pembuluh darah. Pengukuran tekanan darah biasanya dilakukan menggunakan metode auskultasi atau osilometri yang memerlukan manset. Namun, perkembangan teknologi fisiologis digital kini memungkinkan estimasi tekanan darah menggunakan sinyal optik seperti PPG,

karena bentuk gelombang PPG mencerminkan perubahan volume darah dan tekanan yang sejalan dengan siklus jantung (Liu et al., 2021).

Hubungan antara sinyal PPG dan tekanan darah dapat dijelaskan melalui dinamika elastisitas arteri. Ketika tekanan darah meningkat, kekakuan pembuluh darah juga meningkat, sehingga amplitudo dan waktu naik (rising time) pada sinyal PPG menjadi lebih pendek. Analisis turunan pertama dan kedua dari sinyal PPG yakni *Velocity Photoplethysmography* (VPG) dan *Acceleration Photoplethysmography* (APG) dapat menyoroti perubahan kecil dalam percepatan dan refleksi gelombang darah yang berkorelasi langsung dengan nilai tekanan darah (Zhao et al., 2020).

Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa rasio amplitudo antarpuncak APG seperti b/a , c/a , dan d/a berhubungan dengan tekanan darah sistolik dan diastolik. Nilai rasio yang lebih tinggi sering dikaitkan dengan meningkatnya kekakuan arteri dan tekanan sistolik. Korelasi ini menjadikan fitur APG sebagai kandidat yang kuat untuk digunakan dalam model estimasi tekanan darah berbasis sinyal optik yang lebih praktis dan berkelanjutan (Wang et al., 2022).

Dalam konteks implementasi klinis, penggunaan kombinasi fitur PPG dan APG untuk estimasi tekanan darah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Studi terbaru menggabungkan analisis sinyal optik dengan pembelajaran mesin untuk meningkatkan akurasi prediksi tekanan darah non-invasif. Pendekatan ini berpotensi menggantikan metode konvensional yang menggunakan manset, terutama dalam sistem pemantauan tekanan darah kontinu berbasis perangkat wearable dan aplikasi kesehatan digital (Choi et al., 2024).

2.4. Tekanan Darah

Tekanan darah merupakan gaya yang dihasilkan oleh sirkulasi darah terhadap dinding arteri sebagai respons dari aktivitas pemompaan jantung. Tekanan darah terbagi menjadi dua komponen, yaitu tekanan sistolik dan diastolik, yang menggambarkan fase kontraksi dan relaksasi jantung. Nilai tekanan darah dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti volume darah, elastisitas arteri, serta resistansi perifer. Pengukuran tekanan darah secara akurat menjadi indikator penting dalam mendeteksi risiko penyakit kardiovaskular seperti hipertensi, aterosklerosis, dan stroke (Townsend et al., 2020).

Tekanan darah tidak hanya berfungsi sebagai parameter klinis dasar, tetapi juga mencerminkan kesehatan sistem kardiovaskular secara menyeluruh. Peningkatan tekanan darah yang berlangsung lama dapat menyebabkan kerusakan organ target seperti ginjal, otak, dan jantung. Oleh karena itu, pemantauan tekanan darah secara kontinu sangat dibutuhkan untuk mencegah komplikasi serius. Teknologi modern seperti sensor *Photoplethysmography* (PPG) kini dikembangkan untuk estimasi tekanan darah non-invasif sebagai alternatif metode konvensional berbasis manset (Barrett et al., 2023).

2.4.1 Tekanan Darah Sistolik

Tekanan darah sistolik adalah tekanan maksimum yang terjadi pada dinding arteri ketika ventrikel kiri jantung berkontraksi (sistol) dan memompa darah ke seluruh tubuh melalui aorta. Nilai tekanan sistolik mencerminkan kekuatan kontraksi jantung serta elastisitas pembuluh darah arteri. Pada orang dewasa, tekanan sistolik normal umumnya berada di bawah 120 mmHg (Welton et al.,

2018). Peningkatan tekanan sistolik dapat dipengaruhi oleh faktor usia, kekakuan arteri, aktivitas fisik, stres, maupun kondisi patologis seperti hipertensi. Tekanan sistolik yang tinggi secara persisten merupakan salah satu faktor risiko utama terjadinya penyakit kardiovaskular, stroke, dan gagal jantung.

2.4.2 Tekanan Darah Diastolik

Tekanan darah diastolik adalah tekanan minimum pada dinding arteri ketika jantung berada pada fase relaksasi (diastol), yaitu saat ventrikel terisi kembali oleh darah sebelum kontraksi berikutnya. Nilai tekanan diastolik mencerminkan resistansi pembuluh darah perifer dan kondisi elastisitas arteri selama fase istirahat jantung. Pada orang dewasa, tekanan diastolik normal umumnya berada di bawah 80 mmHg. Peningkatan tekanan diastolik menunjukkan adanya peningkatan tahanan perifer yang dapat mengindikasikan gangguan fungsi vaskular. Apabila tekanan diastolik tetap tinggi dalam jangka waktu lama, risiko terjadinya penyakit jantung, gangguan ginjal, dan komplikasi kardiovaskular akan meningkat (Whelton et al., 2018).

2.5. Variabilitas dan Kualitas Sinyal PPG

Photoplethysmography (PPG) merupakan sinyal optik yang sangat sensitif terhadap berbagai faktor fisiologis dan lingkungan, sehingga kualitas sinyal dapat sangat bervariasi antarindividu dan kondisi. Variabilitas sinyal PPG dapat disebabkan oleh faktor internal seperti frekuensi jantung, tonus saraf otonom, dan tekanan darah, serta faktor eksternal seperti posisi tubuh, tekanan sensor, dan cahaya lingkungan. Perbedaan ini menyebabkan ketidakstabilan pada bentuk

gelombang yang direkam, yang dapat memengaruhi keakuratan analisis fisiologis (Liang et al., 2021).

Kualitas sinyal PPG juga sangat bergantung pada kontak sensor dan pergerakan subjek. Gerakan tubuh yang berlebihan menghasilkan artefak mekanis yang mengganggu bentuk gelombang asli, sehingga membuat deteksi puncak dan pengukuran waktu pulsa menjadi tidak akurat. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan filter adaptif, normalisasi baseline, dan algoritma penilaian kualitas sinyal sangat penting untuk meminimalkan gangguan akibat noise dan meningkatkan reliabilitas data PPG yang diambil dari perangkat wearable (Mao et al., 2021).

Selain faktor fisik, variabilitas fisiologis seperti aktivitas saraf simpatik dan perubahan perfusi perifer juga berpengaruh terhadap amplitudo dan frekuensi sinyal PPG. Kondisi seperti stres, suhu kulit, dan tingkat oksigenasi dapat mengubah bentuk dan durasi gelombang PPG. Oleh karena itu, pengukuran yang stabil harus mempertimbangkan kondisi lingkungan dan status fisiologis pengguna untuk memastikan data yang diperoleh benar-benar merepresentasikan keadaan kardiovaskular sebenarnya (Charlton et al., 2022).

Beberapa penelitian mengusulkan metode penilaian kualitas sinyal (Signal Quality Index, SQI) untuk mengidentifikasi bagian sinyal PPG yang valid sebelum analisis lanjutan dilakukan. Metode ini menggunakan parameter statistik seperti kurtosis, skewness, dan rasio daya frekuensi untuk menilai apakah sinyal layak diproses. Penerapan SQI terbukti dapat meningkatkan performa algoritma estimasi

tekanan darah dan deteksi gangguan kardiovaskular berbasis PPG (Wang et al., 2023).

Perkembangan terkini mengintegrasikan sistem penilaian kualitas sinyal berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk meningkatkan akurasi klasifikasi sinyal valid dan tidak valid secara otomatis. Pendekatan ini memungkinkan sistem wearable melakukan pemantauan tekanan darah atau detak jantung secara real-time dengan reliabilitas tinggi. Dengan demikian, pemahaman tentang variabilitas dan kualitas sinyal PPG menjadi aspek fundamental dalam pengembangan teknologi kesehatan digital yang adaptif dan akurat (Shashikumar et al., 2024).

2.6. Aplikasi *Machine Learning*

Penggunaan machine learning dalam analisis sinyal fisiologis seperti *Photoplethysmography* (PPG) dan *Acceleration Photoplethysmography* (APG) telah menjadi tren utama dalam pengembangan sistem estimasi tekanan darah non-invasif. Algoritma pembelajaran seperti *Support Vector Regression* (SVR), *Random Forest*, dan *Artificial Neural Networks* (ANN) digunakan untuk menemukan pola non-linear antara fitur sinyal dan nilai tekanan darah aktual. Pendekatan ini mampu memproses data dalam jumlah besar serta menghasilkan prediksi tekanan darah dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode statistik konvensional (Miao et al., 2023).

Model machine learning modern juga mendukung personalisasi estimasi tekanan darah dengan mempertimbangkan faktor individual seperti usia, jenis kelamin, dan indeks massa tubuh. Beberapa studi menunjukkan bahwa kombinasi fitur temporal, frekuensi, dan morfologis dari sinyal PPG dan APG dapat

meningkatkan keakuratan model hingga lebih dari 90%. Integrasi metode deep learning seperti *Convolutional Neural Network* (CNN) dan Long Short-Term Memory (LSTM) juga memperkuat kemampuan model dalam mengenali pola dinamis sinyal fisiologis secara real-time (Kachuee et al., 2021).

Selain peningkatan akurasi, penggunaan machine learning pada sinyal PPG dan APG juga memberikan efisiensi signifikan dalam pemrosesan data. Sistem berbasis AI memungkinkan pemantauan tekanan darah kontinu melalui perangkat wearable tanpa perlu kalibrasi berulang. Hal ini membuka peluang besar untuk implementasi klinis di bidang telemedicine dan pemantauan pasien jarak jauh. Ke depannya, pengembangan model berbasis transfer learning dan federated learning diharapkan dapat meningkatkan generalisasi serta keamanan data pengguna (Slapničar et al., 2019).

2.7. Perangkat Wearable Non-Invasif

Perangkat wearable non-invasif merupakan inovasi penting dalam bidang pemantauan kesehatan digital yang memungkinkan pengukuran parameter fisiologis secara kontinu tanpa perlu intervensi langsung. Teknologi ini menggunakan sensor optik, mekanik, dan elektromagnetik untuk merekam data vital seperti denyut jantung, saturasi oksigen, serta tekanan darah melalui kulit. Perangkat wearable banyak diaplikasikan pada sistem berbasis *Photoplethysmography* (PPG) karena sifatnya yang portabel, aman, dan nyaman digunakan dalam jangka panjang tanpa menimbulkan rasa tidak nyaman bagi pengguna (Ghamari et al., 2018).

Kemajuan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Artificial Intelligence* (AI) telah memperluas fungsi perangkat wearable dari sekadar pengumpulan data menjadi sistem pemantauan kesehatan cerdas. Integrasi sensor PPG, akselerometer, dan algoritma pembelajaran mesin memungkinkan perangkat wearable untuk memantau tekanan darah, detak jantung, dan pola tidur secara real-time. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa perangkat wearable non-invasif dapat memberikan hasil estimasi tekanan darah yang mendekati keakuratan metode klinis, sehingga berpotensi menjadi alat deteksi dini hipertensi masa depan (Park et al., 2022).

2.8. Kajian Pustaka

Tabel 2. 1 Kajian Pustaka

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Hangsik Shin (2017)	Feasibility Study for the Non-Invasive Blood Pressure Estimation Based on PPG Morphology: Normotensive Subject Study	Penelitian ini menunjukkan bahwa analisis morfologi sinyal PPG serta turunannya (VPG dan APG) dapat digunakan untuk mengekstraksi fitur yang berkorelasi dengan tekanan darah. Fitur-fitur tersebut meningkatkan akurasi estimasi tekanan darah non-invasif dibandingkan dengan sinyal PPG mentah.
2	Moajjem H. Chowdhury (2020)	Estimating Blood Pressure from the Photoplethysmogram Signal and Demographic Features Using Machine Learning Techniques	Estimating Blood Pressure from the Photoplethysmogram Signal and Demographic Features Using Machine Learning Techniques
3	Valentin Fleischhaeuer (2022)	Beat-to-Beat Blood Pressure Estimation by Photoplethysmograph	Studi ini menggunakan dataset besar dengan fitur dari PPG, VPG, dan APG. Model XGBoost menghasilkan prediksi tekanan

		hy and Its Interpretation	darah beat-to-beat dengan error rendah serta menunjukkan potensi penerapan untuk pemantauan real-time.
4	Li Y., Xie L., Miao F., Zheng D. (2022)	Cuffless Blood Pressure Estimation Using Photoplethysmography and Its Derivatives: A Review	Kajian literatur ini menyoroti bahwa turunan sinyal PPG seperti APG mampu meningkatkan sensitivitas estimasi tekanan darah. Penelitian ini juga menekankan pentingnya standarisasi protokol pengukuran untuk validasi klinis.
5	Mohamed Elgendi (2024)	Photoplethysmography Features Correlated with Blood Pressure: A Review of 297 Publications	Hasil penelitian mengidentifikasi rasio b/a, d/a, dan waktu naik (upstroke time) pada sinyal APG sebagai indikator yang signifikan terhadap tekanan sistolik dan diastolik. Metode berbasis turunan PPG terbukti lebih stabil.
6	González S. & Hsieh W.-T. (2023)	A Benchmark for Machine-Learning Based Non-Invasive Blood Pressure Estimation Using Photoplethysmogram	Studi ini membandingkan berbagai model <i>machine learning</i> untuk estimasi tekanan darah menggunakan sinyal PPG. Hasilnya menunjukkan banyak model belum cukup generalisasi antar-individu dan membutuhkan kalibrasi personal.
7	C. Elhajj & P.A. Kyriacou (2021)	Cuffless Blood Pressure Estimation from PPG Signals and Its Derivatives Using Deep Learning Models	Penelitian ini mengembangkan model CNN berbasis sinyal PPG dan derivatifnya. Model menghasilkan MAE < 5 mmHg untuk SBP dan < 3 mmHg untuk DBP, menunjukkan performa yang mendekati alat klinis.
8	Y. Wang, Z. Li & W. He (2023)	Evaluation of Photoplethysmography Signal Quality for Cuffless Blood Pressure Measurement in Daily Life	Studi ini menilai kualitas sinyal PPG dalam aktivitas harian dan menemukan bahwa gangguan gerakan serta perfusi rendah dapat menurunkan akurasi estimasi tekanan darah berbasis PPG.
9	S. Mehta, N. Kwatra, M. Jain & D. McDuff (2024)	Examining the Challenges of Blood Pressure Estimation via Photoplethysmogra	Penelitian ini menemukan adanya kelemahan metodologis dalam banyak studi, seperti data leakage dan multi-valued mapping.

		m Pulse Wave Analysis	Peneliti menekankan perlunya evaluasi berbasis data dunia nyata.
10	J. Choi, B. Kim & K.S. Park (2024)	Continuous Blood Pressure Estimation Using Multi-Site PPG Sensors and Deep Learning	Penelitian ini menggabungkan sensor PPG multi-lokasi (pergelangan tangan dan telinga) dengan model deep learning. Hasil menunjukkan peningkatan signifikan dalam estimasi tekanan darah secara kontinu dan real-time.