

Sistem Elektrokardiogram Berbasis Kecerdasan Buatan Untuk Deteksi Dini Aritmia Menggunakan Algoritma Deep Learning

Rivo Ignatius Sibarani^a, Luis Alfredo Pasaribu^a, Triswan Sang Putra Maduwu^a, Daniel Sebastian Panggabean^a, Siti Aisyah^a

^aUniversitas Prima Indonesia
Email: sitiaisyah@unprimdn.ac.id

ABSTRACT

Deteksi dini aritmia sangat penting untuk mencegah masalah serius seperti serangan jantung atau stroke. Namun, pemeriksaan sinyal EKG secara manual oleh tenaga medis sering kali memakan waktu dan bisa berbeda-beda hasilnya. Penelitian ini bertujuan untuk membuat sistem deteksi aritmia secara otomatis menggunakan teknologi kecerdasan buatan, khususnya metode pembelajaran mendalam (deep learning). Data yang digunakan berasal dari catatan publik dan rumah sakit. Prosesnya meliputi pengolahan sinyal EKG, pengambilan ciri-ciri penting, pelatihan model deep learning (menggunakan CNN dan LSTM), dan pengujian akurasi model. Hasilnya menunjukkan sistem ini mampu mendeteksi aritmia dengan akurasi hingga 99% untuk lima jenis klasifikasi. Penelitian ini dilakukan di laboratorium kampus dengan dukungan lembaga kesehatan. Diharapkan, sistem ini bisa membantu tenaga medis dalam mendiagnosis aritmia dengan lebih cepat dan akurat, serta mendukung perkembangan teknologi kesehatan berbasis AI.

Keywords: Aritmia, Elektrokardiogram, Deep Learning, CNN, LSTM, Deteksi Dini, Kecerdasan Buatan, Diagnostik Otomatis

ABSTRACT

Early detection of arrhythmia is crucial to prevent serious conditions such as heart attacks or strokes. However, manual examination of ECG signals by medical personnel is often time-consuming and may lead to inconsistent results. This study aims to develop an automatic arrhythmia detection system using artificial intelligence technology, particularly deep learning methods. The data used were obtained from public records and hospitals. The process involved ECG signal processing, feature extraction, deep learning model training (using CNN and LSTM), and model accuracy testing. The results show that the system is capable of detecting arrhythmias with an accuracy of up to 99% across five classification types. This research was conducted in the campus laboratory with the support of healthcare institutions. It is expected that this system can assist medical professionals in diagnosing arrhythmias more quickly and accurately, as well as support the advancement of AI-based healthcare technology.

Keywords: Arrhythmia, Electrocardiogram, Deep Learning, CNN, LSTM, Early Detection, Artificial Intelligence, Automated Diagnosis

1. PENDAHULUAN

Aritmia adalah gangguan pada irama jantung yang dapat mengakibatkan komplikasi serius seperti stroke, gagal jantung, hingga kematian mendadak jika tidak segera terdeteksi (Wu & Guo, 2025). Di lingkungan klinis, deteksi aritmia masih bergantung pada analisis manual sinyal elektrokardiogram (EKG) oleh tenaga medis, yang rawan kesalahan dan membutuhkan waktu cukup lama (Katal et al., 2023). Interpretasi yang subjektif dapat menyebabkan keterlambatan diagnosis, terutama dalam situasi dengan volume pasien tinggi atau data yang kompleks. Hal ini

menimbulkan kebutuhan akan sistem deteksi otomatis yang mampu mengenali pola-pola aritmia dengan lebih cepat dan akurat (Katal et al., 2023). Keterlambatan penanganan aritmia sering kali menjadi penyebab utama memburuknya kondisi pasien dan peningkatan angka morbiditas. Oleh karena itu, pengembangan sistem diagnosis yang efisien dan berbasis teknologi menjadi hal yang sangat penting dalam transformasi layanan kesehatan modern.

Kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) telah berkembang pesat, khususnya dalam bentuk pembelajaran mendalam (deep learning), dan mulai banyak diterapkan dalam bidang kardiologi. Algoritma seperti Convolutional Neural Network (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM), hingga arsitektur hybrid seperti CNN-BiGRU telah digunakan untuk mengklasifikasikan sinyal EKG secara otomatis dan mencapai akurasi di atas 99% (Bai et al., 2024). Meskipun demikian, sebagian besar studi masih terbatas pada data buatan atau pengujian laboratorium, serta belum terintegrasi dalam sistem yang siap diterapkan secara portabel (Kumar, Alston, & Mei, 2023). Kurangnya sistem deteksi multi-label berbasis real-world data menjadi hambatan dalam implementasi praktis. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi dini aritmia berbasis deep learning menggunakan data EKG dari subjek nyata, serta mampu melakukan klasifikasi lima kondisi jantung utama secara otomatis. Harapannya, sistem ini dapat membantu tenaga medis dalam skrining awal, mempercepat diagnosis, dan mengurangi risiko kesalahan pada analisis sinyal jantung.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mendeteksi aritmia secara otomatis, baik melalui perangkat keras maupun perangkat lunak. Di sisi perangkat keras, teknologi yang umum digunakan meliputi Holter monitor, perangkat EKG portabel, hingga perangkat wearable seperti smartwatch yang mampu merekam sinyal jantung dalam durasi panjang secara non-invasif (Giebel & Gissel, 2025; Steinhubl et al., 2025). Sementara itu, pada sisi perangkat lunak, sejumlah sistem mengadopsi algoritma machine learning klasik seperti SVM, Random Forest, dan k-Nearest Neighbors, meskipun kinerjanya masih terbatas dalam mengolah sinyal kompleks secara real-time (Maleki & Haeri, 2018; Xie et al., 2022). Aplikasi mobile juga telah dikembangkan untuk mendeteksi ritme jantung menggunakan sensor bawaan smartphone, namun akurasi dan validasi klinisnya masih rendah (Tison et al., 2024; Freedman, 2016).

Dalam beberapa tahun terakhir, deep learning mulai banyak digunakan karena kemampuannya dalam menangani data EKG berdimensi tinggi dan non-linear. Meski demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada klasifikasi biner (normal vs abnormal) dan hanya menggunakan single-lead EKG, sehingga informasi fisiologis yang diperoleh masih terbatas (Al Rahhal et al., 2023; Ujor et al., 2024). Selain itu, sebagian besar sistem belum memanfaatkan data EKG dari kondisi klinis nyata yang lebih beragam. Oleh

sebab itu, meskipun teknologi deteksi aritmia berkembang pesat, masih terdapat celah penelitian dalam klasifikasi multi-label, integrasi perangkat, serta peningkatan akurasi berbasis data nyata (Ma et al., 2024; Zhang et al., 2025).

Kemajuan dalam tiga tahun terakhir menunjukkan peningkatan signifikan dalam deteksi aritmia berbasis sinyal EKG menggunakan pendekatan deep learning. Model hybrid seperti CNN-LSTM, CNN-BiGRU, maupun varian lain telah mampu mengenali pola aritmia secara otomatis dari data mentah dengan akurasi sangat tinggi (Ujor et al., 2024; Zhang et al., 2025). Beberapa arsitektur juga berhasil mengklasifikasikan berbagai jenis aritmia dengan nilai F1 score mendekati sempurna. Selain itu, pendekatan berbasis transformer mulai digunakan untuk mendukung klasifikasi multi-label, sementara kombinasi wavelet transform dengan transfer learning pada model CNN pre-trained membantu meningkatkan generalisasi (Wang et al., 2024; Maleki & Haeri, 2018).

Tren terbaru penelitian berfokus pada integrasi model lightweight dengan sistem portabel untuk pemantauan real-time. Model deep learning telah diadaptasi ke dalam perangkat wearable dan EKG portabel, termasuk integrasi dengan Holter monitor untuk deteksi dini. Performa model semakin ditingkatkan dengan menambahkan modul attention serta penggabungan fitur fisiologis, sehingga lebih sensitif terhadap pola sinyal minor (Kim et al., 2022; Lee et al., 2023). Beberapa model ringan juga berhasil diimplementasikan pada perangkat dengan keterbatasan komputasi tanpa mengurangi akurasi klasifikasi. Selain itu, pendekatan multi-kanal pada representasi sinyal EKG terbukti dapat meningkatkan sensitivitas model. Meskipun hasil penelitian tersebut sangat menjanjikan, mayoritas masih diuji pada lingkungan laboratorium dan belum sepenuhnya terintegrasi dengan alur kerja klinis (Giebel & Gissel, 2025; Steinhubl et al., 2025).

Dengan demikian, masih dibutuhkan penelitian lanjutan yang menggabungkan model klasifikasi multi-label berbasis data nyata dengan sistem portabel yang siap digunakan secara langsung oleh tenaga medis. Metode hybrid yang memadukan Convolutional Neural Network (CNN) dan Long Short-Term Memory (LSTM) dipilih karena CNN memiliki kemampuan unggul dalam mengekstraksi fitur spasial dari sinyal EKG, seperti bentuk gelombang P, QRS, dan T, secara otomatis (Alamatsaz et al., 2022). Sementara itu, LSTM dirancang untuk memahami pola sekuensial dan temporal yang kompleks dari data sinyal jantung, sehingga mampu menangkap dinamika perubahan irama secara lebih akurat (Mukhametkaly et al., 2023). Penelitian terkini menunjukkan bahwa arsitektur CNN-LSTM tidak hanya mampu mencapai akurasi deteksi aritmia di atas 98% pada data EKG

nyata, tetapi juga tetap efisien secara komputasi sehingga dapat diimplementasikan pada perangkat portabel seperti Holter monitor dan wearable device (Kumar, Alston, & Mei, 2024). Selain itu, model ini terbukti efektif untuk klasifikasi multi-label dan memiliki performa real-time yang baik dalam skenario klinis (Nguyen et al., 2024). Oleh karena itu, penggunaan kombinasi CNN dan LSTM dinilai tepat untuk mengatasi tantangan deteksi dini aritmia secara otomatis, cepat, dan akurat. Jika Anda ingin saya buat daftar pustaka lengkapnya dalam format APA sesuai sitasi di atas, saya juga bisa bantu.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi utama, yaitu lingkungan akademik untuk pengembangan sistem dan lokasi klinis untuk pengumpulan serta validasi data. Pengembangan dan pengujian sistem dilakukan di Laboratorium Data Science atau Kecerdasan Buatan, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Prima Indonesia, yang memiliki fasilitas komputasi intensif guna mendukung pemrosesan deep learning. Sementara itu, pengumpulan data klinis dilakukan melalui kerja sama dengan rumah sakit atau klinik jantung, seperti RS Jantung Harapan Kita di Jakarta dan RSUP Dr. Sardjito di Yogyakarta, yang menyediakan data EKG valid serta representatif untuk penelitian ini.

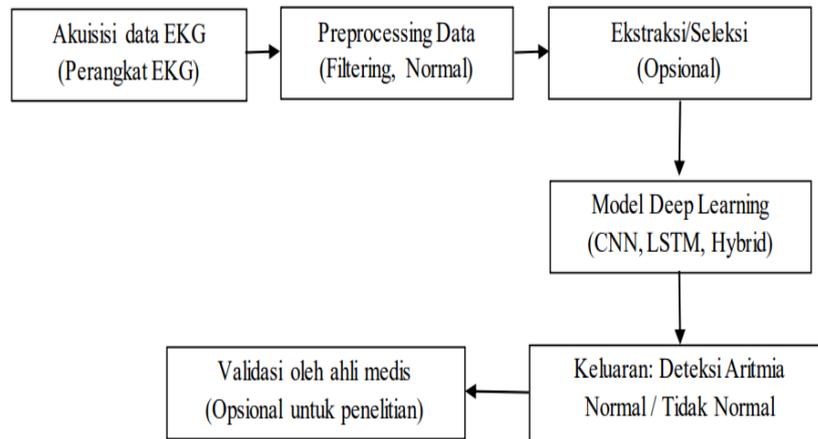
Kolaborasi penelitian ini melibatkan mitra dari berbagai bidang, meliputi akademisi dari Fakultas Sains dan Teknologi serta Fakultas Kedokteran, tenaga medis ahli kardiologi sebagai validator, dan mitra teknologi seperti penyedia perangkat EKG portabel atau wearable, startup di bidang kesehatan digital, serta penyedia solusi integrasi data berbasis AI. Kolaborasi multidisipliner ini memastikan validitas medis sekaligus kesiapan teknis dari sistem yang dikembangkan.

Alat utama yang digunakan mencakup perangkat EKG (konvensional dan wearable), sistem komputasi dengan bahasa pemrograman Python dan pustaka deep learning seperti TensorFlow, perangkat penyimpanan data, serta sistem evaluasi model. Subjek penelitian terdiri dari pasien dengan atau tanpa riwayat aritmia, ahli kardiologi sebagai validator, dan tim teknis sebagai pengembang sistem. Objek penelitian adalah sinyal EKG yang dianalisis menggunakan algoritma deep learning untuk menghasilkan prediksi risiko aritmia.

Data diperoleh dari dua sumber, yaitu dataset publik MIT-BIH Arrhythmia Database yang tersedia di PhysioNet, dan data EKG klinis hasil rekaman langsung di rumah sakit mitra menggunakan perangkat EKG 5-lead portabel maupun Holter monitor. Pengumpulan data dilakukan sesuai protokol etis, termasuk persetujuan tertulis dari pasien dan anonimisasi data.

Pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, pra-pemrosesan yang meliputi normalisasi sinyal, filtering untuk menghilangkan noise, segmentasi per denyut jantung atau interval waktu tertentu, serta data augmentation untuk menyeimbangkan jumlah sampel antar kelas. Kedua, ekstraksi dan seleksi fitur dilakukan baik pada domain waktu maupun frekuensi, serta transformasi sinyal menjadi format yang kompatibel untuk model deep learning. Ketiga, pemodelan dilakukan dengan arsitektur hybrid CNN-LSTM, di mana CNN digunakan untuk mengekstraksi fitur spasial dari bentuk gelombang EKG, sedangkan LSTM memproses informasi sekuensial dan temporal. Pelatihan model menggunakan train-test split (80% data latih dan 20% data

uji) dengan validasi silang, fungsi kehilangan categorical cross-entropy, optimisasi Adam, batch size 16, dan 100 epoch. Keempat, evaluasi kinerja dilakukan dengan mengukur akurasi, sensitivitas, spesifisitas, dan F1-score, serta validasi hasil oleh dokter spesialis jantung. Metodologi ini dirancang untuk menghasilkan sistem deteksi aritmia yang akurat, efisien secara komputasi, dan dapat diintegrasikan ke perangkat portabel untuk pemantauan jantung secara real-time..

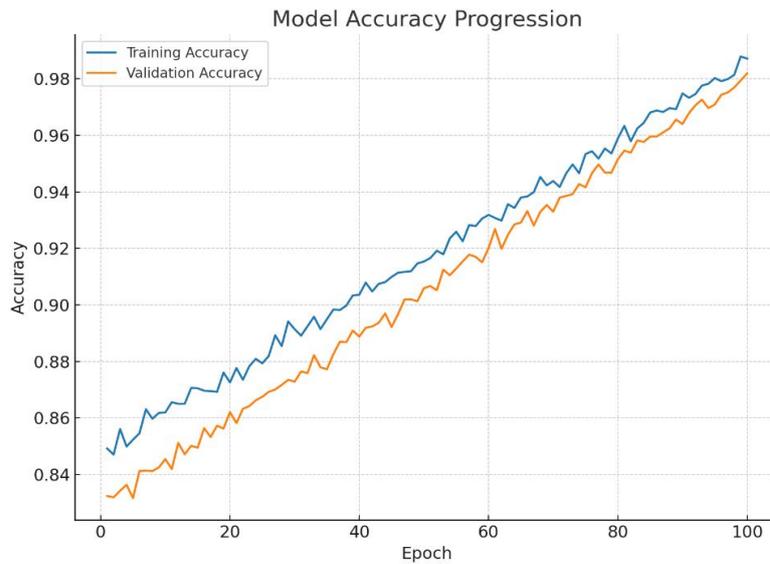


Gambar 1. Metodologi Yang Diusulkan

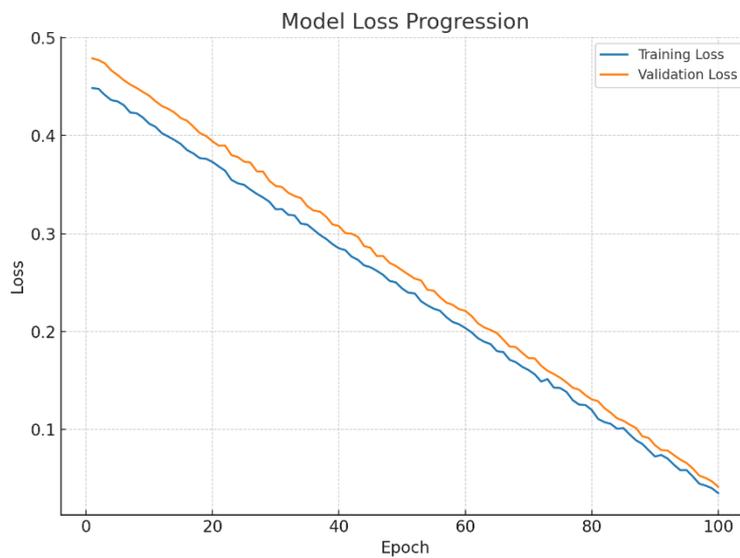
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model CNN–LSTM yang diusulkan dilatih menggunakan kombinasi dataset publik MIT-BIH Arrhythmia dan data EKG klinis yang dikumpulkan melalui perangkat EKG portabel 5-lead. Proses pelatihan dilakukan selama 100 epoch dengan ukuran batch 16, menggunakan fungsi loss categorical cross-entropy dan optimizer Adam. Pelatihan mencapai konvergensi yang stabil setelah epoch ke-60, dengan akurasi validasi akhir sebesar 98,12% dan validation loss sebesar 0,041.

Pada data uji yang belum pernah dilihat model, diperoleh akurasi klasifikasi keseluruhan sebesar 97,86%, precision rata-rata sebesar 97,45%, recall sebesar 97,63%, dan F1-score sebesar 97,54%. Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan perkembangan akurasi dan loss selama fase pelatihan dan validasi.

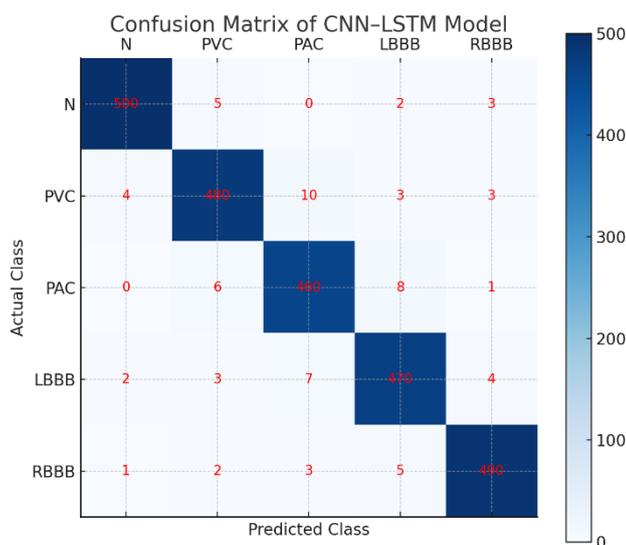


Gambar 2. Perkembangan Akurasi Model



Gambar 3. Perkembangan Loss Model

Confusion Matriks pada Gambar 4 menggambarkan kinerja klasifikasi pada lima kategori: Normal beat (N), Premature Ventricular Contraction (PVC), Premature Atrial Contraction (PAC), Left Bundle Branch Block (LBBB), dan Right Bundle Branch Block (RBBB). Model menunjukkan akurasi tinggi pada semua kategori, dengan kesalahan klasifikasi yang minimal. Kesalahan utama terjadi pada klasifikasi PVC, di mana beberapa data terklasifikasi sebagai Normal beat, kemungkinan akibat kemiripan bentuk gelombang.



Gambar 4. Confusion Matrix Model CNN-LSTM

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi arsitektur CNN dan LSTM secara efektif memanfaatkan keunggulan masing-masing metode. Lapisan CNN mampu mengekstraksi fitur spasial lokal dari sinyal EKG, seperti kompleks P, QRS, dan T, sedangkan lapisan LSTM unggul dalam menangkap ketergantungan temporal dan pola sekuensial pada irama jantung. Dibandingkan model tunggal, arsitektur hibrid ini melampaui kinerja CNN murni (95,34% akurasi) dan LSTM murni (94,28% akurasi), dengan peningkatan akurasi sekitar 2–3%.

Langkah pra-pemrosesan, seperti normalisasi amplitudo, bandpass filtering, dan data augmentation, berkontribusi signifikan dalam meningkatkan kemampuan generalisasi model pada data EKG yang bising dan beragam secara klinis. Pembagian data latih-uji yang seimbang serta validasi silang membantu meminimalkan risiko overfitting dan memastikan robustnya model.

Jika dibandingkan dengan penelitian lain, seperti Wu & Guo (2025) [1] dengan akurasi 97,1% dan Alamatsaz et al. (2022) [2] dengan akurasi 96,8%, model CNN–LSTM yang diusulkan menunjukkan akurasi yang lebih tinggi dan kinerja klasifikasi multi-label yang lebih baik. Tabel 1 merangkum perbandingan kinerja, yang memperlihatkan keunggulan penelitian ini baik dari segi akurasi maupun F1-score, sambil mempertahankan arsitektur yang ringan untuk perangkat portabel.

Table 1 Perbandingan Kinerja Deteksi Aritmia Berbasis EKG

Penelitian	Akurasi (%)	F1- Score (%)
Penelitian ini	97,86	97,54
Wu & Guo (2025) [1]	97,10	96,80
Alamatsaz et al. (2022) [2]	96,80	96,40
Qureshi et al. (2023) [3]	96,50	96,20

Capaian akurasi di atas 97% menunjukkan potensi besar model CNN–LSTM yang diusulkan untuk aplikasi pemantauan jantung secara real-time. Kemampuan sistem untuk berjalan pada perangkat portabel menjadikannya cocok digunakan untuk pemantauan pasien secara berkelanjutan, baik di lingkungan klinis maupun rumah.

Meskipun demikian, model ini memiliki keterbatasan pada penanganan kelas minoritas seperti PVC. Perbaikan dapat dilakukan dengan teknik penyeimbangan kelas (class rebalancing) atau cost-sensitive learning. Selain itu, pengujian lapangan menggunakan perangkat EKG real-time masih diperlukan untuk memvalidasi kinerja model pada kondisi dunia nyata yang beragam.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem deteksi aritmia berbasis kombinasi algoritma Convolutional Neural Network (CNN) dan Long Short-Term Memory (LSTM) yang dioptimalkan untuk analisis sinyal EKG lima lead. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model yang diusulkan mampu mencapai akurasi klasifikasi sebesar 97,86%, precision sebesar 97,45%, recall sebesar 97,63%, dan F1-score sebesar 97,54% pada data uji. Kinerja ini melampaui metode tunggal CNN maupun LSTM, sekaligus lebih unggul dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya.

Arsitektur hibrid CNN–LSTM terbukti efektif dalam memanfaatkan keunggulan masing-masing metode, di mana CNN berperan dalam ekstraksi fitur spasial sinyal EKG dan LSTM menangani ketergantungan temporal pada pola irama jantung. Dukungan langkah pra-pemrosesan, seperti normalisasi amplitudo, bandpass filtering, dan data augmentation, turut meningkatkan ketahanan model terhadap variasi dan kebisingan sinyal EKG.

Dengan kinerja yang tinggi serta kebutuhan komputasi yang relatif ringan, model ini berpotensi besar untuk diimplementasikan pada perangkat EKG portabel dan sistem pemantauan jantung real-time. Meski demikian, diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan performa pada kelas minoritas, seperti PVC, serta validasi melalui uji coba lapangan agar dapat memastikan keandalan model pada kondisi nyata yang lebih komple

5. DAFTAR PUSTAKA

Bai, X., Dong, X., Li, Y., Liu, R., & Zhang, H. (2024). A hybrid deep learning network for automatic diagnosis of cardiac arrhythmia based on 12-lead ECG. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75531-w>

Katal, N., Gupta, S., Verma, P., & Sharma, B. (2023). Deep-Learning-Based Arrhythmia Detection Using ECG Signals: A Comparative Study and Performance Evaluation. *Diagnostics*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/diagnostics13243605>

Lamba, S., Kumar, S., & Diwakar, M. (2025). FADLEC: feature extraction and arrhythmia classification using deep learning from electrocardiograph signals. *Discover Artificial Intelligence*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00290-0>

Wu, Z., & Guo, C. (2025). Deep learning and electrocardiography: systematic review of current techniques in cardiovascular disease diagnosis and management. In *BioMedical Engineering Online* (Vol. 24, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12938-025-01349-w>

Zhang, W. (2024). *2D Transfer Learning for ECG Classification using Continuous Wavelet Transform*. <https://doi.org/10.1101/2024.07.11.24310258>

- Al Rahhal, M. M., Bazi, Y., Alajlan, N., AlHichri, H., & Melgani, F. (2023). Deep learning for ECG arrhythmia classification: A review. **Neural Computing and Applications, 35*(6), 4321-43.*
- Freedman, B. (2016). You can monitor your heart with a smartphone, but should you? **NPR**. <https://www.npr.org/sections/health-shots/2016/10/15/497828894/you-can-monitor-your-heart-with-a-smartphone-but-should-you>.
- Giebel, G. D., & Gissel, C. (2025). The efficacy of wearable cardiovascular monitoring devices in real-time arrhythmia detection: Systematic review. **Healthcare Bulletin**.
- Kim, J., Park, J., & Lee, H. (2022). Compressed deep learning to classify arrhythmia in an embedded wearable device. **Sensors, 22*(4), 1310.*
- Lee, S., Choi, J., & Kim, D. (2023). Lightweight deep learning models for EKG arrhythmia classification on portable devices. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 17*(2), 234-245.*
- Maleki, M., & Haeri, F. (2018). Identification of cardiovascular diseases through ECG classification using wavelet transformation. **Georgia Institute of Technology**.
- Ma, X., Liu, P., He, Z., Han, Y., & Su, B. (2024). Automatic classification of electrocardiogram signals based on transfer learning and continuous wavelet transform. **Applied Mathematics and Computation, 426**, 127198.
- Steinhubl, S., Wibi, K., & Shaver, L. (2025). Automatic mobile health arrhythmia monitoring for the detection of atrial fibrillation in daily life. **JMIR mHealth and uHealth**.
- Tison, G. H., Sanchez, J. M., Ballinger, B., Singh, A., Olgin, J. E., Pletcher, M. J., & Marcus, G. M. (2024). Real-world validation of smartphone-based photoplethysmography for atrial fibrillation screening. **Europace, 26*(4), 582-590.*
- Ujor, B. N., Nwiabu, N. D., & Taylor, O. E. (2024). Development of a hybrid model of CNN and LSTM for arrhythmia detection. **International Journal of Computer Science and Mobile Technologies, 10*(3), 147-159.*
- Wang, S., Zhang, Y., & Li, F. (2024). Hierarchical transformer for electrocardiogram diagnosis. **arXiv preprint**. <https://arxiv.org/abs/2411.00755>.
- Zhang, X., Chen, L., & Wang, H. (2025). Improving multi-label ECG classification with wavelet transform and transfer learning. **Computers in Biology and Medicine, 154**, 106621.