

REGRESI MORFOLOGI SINYAL ELEKTROKARDIOGRAM BERBASIS *LONG-SHORT TERM MEMORY*

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer**



OLEH :

Prima Putra Agusantara

09011482326002

**JURUSAN SISTEM KOMPUTER
FAKULTAS ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2025

HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

REGRESI MORFOLOGI SINYAL ELEKTROKARDIOGRAM BERBASIS *LONG-SHORT TERM MEMORY*

Sebagai salah satu syarat untuk penyelesaian studi di

Program Studi S1 Sistem Komputer

Oleh:

PRIMA PUTRA AGUSANTARA

09011482326002

Pembimbing 1 : Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T.
NIP. 196908021994012001

Mengetahui

Ketua Jurusan Sistem Komputer



Dr. Ir. Sukemi, M.T
196612032006041001

AUTHENTICATION PAGE

SKRIPSI

ELECTROCARDIOGRAM SIGNAL MORPHOLOGY REGRESSION BASED ON LONG SHORT-TERM MEMORY

As one of the requirements for completing the
Bachelor's Degree Program in Computer Systems

By:

PRIMA PUTRA AGUSANTARA
09011482326002

Advisor 1 : Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T.
NIP. 196908021994012001

Approved by,

Head of Computer System Departement



Dr. Ir. Sukemi, M.T
196612032006041001

HALAMAN PERSETUJUAN

Telah diuji dan lulus pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 24 Juli 2025

Tim Penguji

1. Ketua : Prof. Dr. Ir. Bambang Tutuko, M.T.

2. Penguji : Dr. Firdaus, M.Kom.

3. Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T.

Signature 9/9/2025
Signature
Signature

Mengetahui, *Signature*
Ketua Jurusan Sistem Komputer



LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Prima Putra Agusantara

Nim : 09011482326002

Judul : Regresi Morfologi Sinyal Elektrokardiogram Berbasis *Long-Short Term Memory*

Hasil pemeriksaan *Software Turnitin*: 4%

Menyatakan bahwa laporan skripsi saya merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil penjiplakan atau plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan atau plagiat dalam laporan tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa paksaan dari siapapun.



Palembang, Agustus 2025



Prima Putra Agusantara

NIM. 09011482326002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, kasih sayang dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Regresi Morfologi Sinyal Elektrokardiogram Berbasis *Long-Short Term Memory*”.

Dalam laporan ini, penulis menjelaskan mengenai sistem regresi untuk melakukan prediksi terhadap posisi dari *R-Peak* sinyal EKG berbasis metode pembelajaran *Deep Learning*. Penulis berharap agar tulisan ini dapat bermanfaat bagi orang banyak.

Selama penulisan Skripsi ini, penulis banyak mendapatkan ide, bantuan, serta saran dari semua pihak, baik secara langsung maupun tak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa ta'ala yang telah melimpahkan berkah serta nikmat kesehatan dan kesempatan kepada penulis dalam melaksanakan Tugas Akhir.
2. Orang tua, saudara, dan keluarga besar yang telah mendoakan dan memberikan motivasi serta support.
3. Bapak Prof. Dr. Erwin, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Ir. Sukemi, M.T., selaku Ketua Jurusan Sistem Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Siti Nurmaini, M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Tugas Akhir yang telah berkenan meluangkan waktunya guna membimbing, memberikan saran dan motivasi serta bimbingan terbaik untuk penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Para mentor di IsysRG yang telah membantu mengarahkan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Intelligent System Research Group yang telah membantu dalam menyediakan infrastruktur yang bermanfaat bagi penelitian penulis
8. Dan semua pihak yang telah membantu.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih sangat jauh dari kata sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang membangun sangatlah diharapkan penulis. Akhir kata penulis berharap, semoga skripsi ini bermanfaat dan berguna bagi khalayak.

Palembang, Agustus 2025

Penulis,



Prima Putra Agusantara
NIM. 09011482326002

REGRESI MORFOLOGI SINYAL ELEKTROKARDIOGRAM BERBASIS LONG-SHORT TERM MEMORY

PRIMA PUTRA AGUSANTARA (09011482326002)

Jurusan Sistem Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya

Email : primatara42@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model yang dapat melakukan regresi posisi anotasi *R-Peak* pada *beat* sinyal. Dataset yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari *Lobachevsky University Electrocardiography Database (LUDB)* dengan menggunakan *lead ii*. Model dikembangkan menggunakan arsitektur *Long Short-Term Memory (LSTM)* yang terdiri dari *Masking layer*, dua lapisan *LSTM* masing-masing dengan 64 unit, *Dropout layer* sebesar 25% untuk regularisasi, *Layer Normalization*, serta dua lapisan *Dense* untuk regresi. Model dikompilasi menggunakan *Huber Loss* dengan nilai *delta* 0.1 dan *optimizer Adam* dengan *learning rate* sebesar 0.001. Proses pelatihan menggunakan *batch size* sebesar 16 dan dilakukan selama maksimum 100 *epoch*, dengan implementasi *early stopping* dan *reduce learning rate* untuk mencegah *overfitting*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model memiliki performa prediksi yang baik, dengan nilai *Mean Absolute Error (MAE)* pada data latih sebesar $\pm 14,43$ sampel, pada data validasi sebesar $\pm 9,16$ sampel, dan pada data unseen sebesar $\pm 11,10$ sampel. Hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa model *LSTM* yang telah dibangun tidak hanya mampu mempelajari pola dari data latih tetapi juga dapat mempertahankan ketepatan prediksi ketika model bertemu sinyal baru yang belum dikenali.

Kata Kunci : *Electrocardiogram, Deep Learning, Regresi, Long-Short Term Memory*

ELECTROCARDIOGRAM SIGNAL MORPHOLOGY REGRESSION BASED ON LONG SHORT-TERM MEMORY

PRIMA PUTRA AGUSANTARA (09011482326002)

*Computer Engineering Department, Computer Science Faculty, Sriwijaya
University*

Email : primatara42@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to develop a model capable of performing regression on the position of R-Peak annotations within ECG beat signals. The dataset used in this research is derived from the Lobachevsky University Electrocardiography Database (LUDB), utilizing only lead II. The model is built using a Long Short-Term Memory (LSTM) architecture consisting of a Masking layer, two LSTM layers with 64 units each, Dropout layers of 25% for regularization, a Layer Normalization layer, and two Dense layers for regression output. The model is compiled using the Huber Loss function with a delta value of 0.1 and the Adam optimizer with a learning rate of 0.001. The training process employs a batch size of 16 and runs for a maximum of 100 epochs, with early stopping and learning rate reduction implemented to prevent overfitting. Evaluation results show that the model performs well in predicting the R-Peak positions, achieving a Mean Absolute Error (MAE) of ± 14.43 samples on the training data, ± 9.16 samples on the validation data, and ± 11.10 samples on unseen data. These results indicate that the developed LSTM model is not only capable of learning the patterns from the training data but also maintains prediction accuracy when encountering new, unseen ECG signals.

Keywords : *Electrocardiogram, Deep Learning, Regression, Long-Short Term Memory*

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	II
AUTHENTICATION PAGE	III
HALAMAN PERSETUJUAN	IV
LEMBAR PERNYATAAN	V
KATA PENGANTAR.....	VI
ABSTRAK	VIII
<i>ABSTRACT</i>	IX
DAFTAR ISI.....	X
DAFTAR GAMBAR.....	XII
DAFTAR TABEL	XIII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Penelitian Terdahulu.....	4
2.2 Elektrokardiogram	6
2.3 <i>Discrete Wavelete Transform</i> (DWT)	8
2.4 <i>Deep Learning</i>	10
2.5 <i>Long Short-Term Memory</i> (LSTM).....	11
2.6 <i>Lobachevsky University Electrocardiography Databases</i>	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	14
3.1 Kerangka Kerja.....	14
3.2 Persiapan Data	16
3.3 <i>Pre-Processing Data</i>	18
3.3.1 Pengurangan Derau	19
3.3.2 Normalisasi	21
3.3.3 Segmentasi Sinyal.....	21

3.4	<i>Splitting Data</i>	23
3.5	Perancangan dan Pelatihan Model LSTM	24
3.6	Evaluasi Model	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		28
4.1	Hasil Pelatihan Model.....	28
4.1.1	Evaluasi Kinerja Model.....	29
4.1.2	Visualisasi Kinerja Model.....	30
4.2	Evaluasi Model pada Data <i>Unseen</i>	32
4.2.1	Hasil Evaluasi Data <i>Unseen</i>	32
4.2.2	Visualisasi Prediksi pada Data <i>Unseen</i>	34
4.3	Evaluasi Prediksi Posisi <i>P-Peak</i>	36
BAB V KESIMPULAN		40
5.1	Kesimpulan	40
5.2	Saran	41
DAFTAR PUSTAKA		42
LAMPIRAN.....		42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sinyal Elektrokardiogram	6
Gambar 2.2 Anotasi dari Sinyal EKG.....	7
Gambar 2.3 Model Filter Dekomposisi DWT	10
Gambar 2.4 Tahap <i>Forward</i> pada <i>LSTM</i>	11
Gambar 2.5 Tahap <i>Backward</i> pada <i>LSTM</i>	12
Gambar 3.1 Kerangka Kerja Penelitian	15
Gambar 3.2 Alur Kerja dari Persiapan Data	17
Gambar 3.3 Tahap <i>Pre-Processing</i> Data	19
Gambar 3.4 Perbandingan Sampel Sinyal Sebelum dan Setelah <i>Denoise</i>	20
Gambar 3.5 Hasil Setelah Sampel Sinyal EKG Dilakukan Normalisasi	21
Gambar 3.6 Contoh Hasil Segmentasi Masing - Masing <i>Beat</i> pada <i>Record 1</i>	23
Gambar 4.1 Grafik <i>Learning Curve Loss</i> pada Data Latih dan Validasi	30
Gambar 4.2 Grafik <i>Learning Curve MAE</i> pada Data Latih dan Validasi	31
Gambar 4.3 Contoh Visualisasi Prediksi <i>R-Peak</i> pada Data <i>Unseen</i>	35
Gambar 4.4 Visualisasi Prediksi Posisi <i>P-Peak</i> oleh Model pada Data <i>Unseen</i> ..	38

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penjelasan dari Anotasi Sinyal EKG	7
Tabel 3.1 Jumlah Rekaman Sinyal EKG Berdasarkan Jenis Ritme.....	16
Tabel 3.2 Data Sinyal EKG Setelah Di Ekstrak.....	18
Tabel 3.3 <i>Sample</i> Dataset <i>LUDB</i> Setelah Diekstrak	18
Tabel 3.4 Hasil Perbandingan SNR dari Seluruh <i>Wavelet</i>	20
Tabel 3.5 Jumlah <i>Beat</i> Sinyal dari Masing- Masing Data	24
Tabel 3.6 Parameter Umum Model LSTM	25
Tabel 3.7 Parameter Model LSTM	26
Tabel 4.1 Hasil Evaluasi Model	29
Tabel 4.2 Hasil Evaluasi Model Setelah Denormalisasi Indeks Posisi Sampel	29
Tabel 4.3 Hasil Evaluasi Model pada Seluruh Data	33
Tabel 4.4 Hasil Evaluasi Model Prediksi Posisi <i>R-Peak</i> dan <i>P-Peak</i>	36

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Form Perbaikan Ujian Penguji

Lampiran 2. Form Perbaikan Ujian Pembimbing

Lampiran 3. Hasil Cek Plagiarisme di Turnitin

Lampiran 4. Verifikasi USEPT

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagian besar kematian akibat penyakit jantung disebabkan oleh fakta bahwa sebagian besar orang tidak menyadari bahwa jantung adalah organ penting yang harus diperiksa secara teratur [1]. Salah satu pemeriksaan yang biasa digunakan adalah dengan melakukan analisis sinyal elektrokardiogram (EKG) yang dapat merekam aktivitas elektrik jantung melalui elektroda tubuh [2]. Elektrokardiogram (EKG) adalah alat yang menunjukkan bagaimana aktivitas elektrik jantung tersadap melalui elektroda tubuh. Sinyal elektrokardiogram terdiri dari tiga gelombang dasar: gelombang P, Kompleks QRS, dan T. Analisa hubungan antara gelombang P dan Kompleks QRS membantu membedakan aritmia jantung, dan interval PR yang berbeda dapat menunjukkan blok jantung yang berbeda [3].

Sebelumnya, analisis sinyal EKG telah dilakukan secara manual untuk melakukan diagnosis terhadap jantung. Analisis EKG secara manual membutuhkan waktu, tenaga dan keterampilan medis yang mumpuni. Pendekatan ini memiliki sejumlah kelemahan yang mendasar diantaranya adalah rentannya gangguan *noise* seperti *baseline wander*, interferensi daya listrik (*power-line interference*) dan artefak otot yang dapat merusak bentuk asli dari sinyal. Hal ini dapat mengganggu indentifikasi morfologi sinyal secara akurat [4]. Kelemahan berikutnya adalah interpretasi visual yang dilakukan oleh manusia umumnya membutuhkan waktu yang lama dan tidak efisien khususnya ketika menangani data sinyal yang banyak [5]. Pada kasus sinyal EKG yang kompleks, mengandung gangguan irama menyebabkan interpretasi sinyal EKG secara manual cenderung gagal untuk mengenali fitur – fitur kritis sehingga dapat berpotensi salah interpretasi [6]. Proses analisis sinyal EKG secara manual cenderung menghasilkan perbedaan interpretasi antar pengamat yang berkontribusi terhadap rendahnya konsistensi dan standarisasi hasil analisis [7]. Oleh karena itu, dalam beberapa

tahun terakhir, penelitian telah dilakukan untuk mengotomatisasi analisis elektrokardiogram dengan menggunakan metode *deep learning* [8].

Kemajuan di bidang kecerdasan buatan khususnya *Machine Learning* dan *Deep Learning* telah menciptakan peluang baru dalam menganalisis sinyal biomedis salah satunya adalah sinyal EKG [9]. Beberapa penelitian telah menunjukkan keberhasilan implementasi model *Deep Learning* untuk melakukan deteksi aritmia, klasifikasi gangguan irama jantung beserta delineasi morfologi sinyal EKG [10].

Dalam menangani data seri waktu, jaringan saraf tiruan Long Short-Term Memory (LSTM) mengatasi masalah vanishing gradient yang sering terjadi pada jaringan saraf konvensional. Dalam beberapa tahun terakhir, LSTM telah digunakan dalam berbagai aplikasi medis dan sinyal biomedis, termasuk prediksi serangan jantung, klasifikasi aritmia, dan deteksi abnormalitas jantung. Ini karena kemampuan LSTM untuk menyimpan informasi dalam jangka waktu yang lebih lama, yang membuatnya ideal untuk menganalisis data yang memiliki dependensi temporal, seperti sinyal EKG [11], [12], [13].

Penelitian ini akan melakukan pendekatan regresi berbasis LSTM untuk memprediksi posisi dari anotasi *R-Peak* pada suatu *beat* sinyal EKG. Fokus penelitian ini adalah menggunakan dataset dari *Lobachevsky University Electrocardiography Database* (LUDB). Dengan memanfaatkan model LSTM, diharapkan dapat memperoleh hasil prediksi dari posisi *R-Peak* yang lebih presisi sehingga dapat digunakan untuk analisis morfologi sinyal EKG secara otomatis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi langkah awal pengembangan sistem pendukung diagnosis penyakit jantung yang cepat, efisien, dan akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan hal yang telah dijelaskan pada latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini terdiri dari :

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan model LSTM untuk melakukan regresi posisi anotasi *R-Peak* pada sinyal EKG?

2. Bagaimana mengukur kinerja model untuk mengetahui apakah kemampuan regresi posisi anotasi *R-Peak* pada *beat* sudah baik dan dapat mendukung analisis morfologi sinyal EKG secara otomatis?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan penjelasan dari latar belakang, berikut adalah batasan masalah dari penelitian ini :

1. Penelitian ini akan menggunakan data dari *Lobachevsky University Electrocardiography Database* (LUDB) dengan menggunakan *lead ii*.
2. Dalam merancang program akan menggunakan bahasa pemrograman *Python*.
3. Melakukan regresi terhadap posisi dari *R-Peak* pada *beat* sinyal EKG.
4. Model yang akan dirancang adalah menggunakan algoritma *Regresi Long Short-term Memory*.

1.4 Tujuan

Adapun beberapa tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini diantaranya adalah :

1. Membangun model LSTM untuk memprediksi posisi anotasi *R-Peak* pada *beat* sinyal.
2. Mengevaluasi kemampuan dari model regresi yang sudah dilatih untuk memastikan akurasi prediksi posisi anotasi *R-Peak* dapat mendukung analisis morfologi sinyal EKG secara otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Rifali and D. Irmawati, “Sistem Cerdas Deteksi Sinyal Elektrokardiogram (EKG) untuk Klasifikasi Jantung Normal dan Abnormal Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (JST),” *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 4, no. 1, pp. 49–55, Nov. 2019, doi: 10.21831/elinvo.v4i1.28242.
- [2] M. Wasimuddin, K. Elleithy, A. S. Abuzneid, M. Faezipour, and O. Abuzaghlleh, “Stages-based ECG signal analysis from traditional signal processing to machine learning approaches: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 177782–177803, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3026968.
- [3] E. Merdjanovska and A. Rashkovska, “Comprehensive survey of computational ECG analysis: Databases, methods and applications,” Oct. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.eswa.2022.117206.
- [4] T. Stracina, M. Ronzhina, R. Redina, and M. Novakova, “Golden Standard or Obsolete Method? Review of ECG Applications in Clinical and Experimental Context,” Apr. 25, 2022, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fphys.2022.867033.
- [5] “Frontmatter,” in *IST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES (ICCBS’22)*, Sciendo, 2023, pp. I–VIII. doi: 10.2478/9788367405256-fm.
- [6] M. Velic, I. Padavic, and S. Car, “Computer aided ECG analysis — State of the art and upcoming challenges,” in *Eurocon 2013*, IEEE, Jul. 2013, pp. 1778–1784. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625218.
- [7] A. Lyon, A. Minchol  , J. P. Martínez, P. Laguna, and B. Rodriguez, “Computational techniques for ECG analysis and interpretation in light of their contribution to medical advances,” Jan. 01, 2018, *Royal Society Publishing*. doi: 10.1098/rsif.2017.0821.
- [8] P. S. Studi, T. Elektro, F. Teknik Elektro, and A. Rizal, “Perbandingan Skema Dekomposisi Paket Wavelet untuk Pengenalan Sinyal EKG,” 2015.

- [9] S. Kiranyaz, T. Ince, and M. Gabbouj, "Real-Time Patient-Specific ECG Classification by 1-D Convolutional Neural Networks," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 63, no. 3, pp. 664–675, Mar. 2016, doi: 10.1109/TBME.2015.2468589.
- [10] P. Rajpurkar, A. Y. Hannun, M. Haghpanahi, C. Bourn, and A. Y. Ng, "Cardiologist-Level Arrhythmia Detection with Convolutional Neural Networks," Jul. 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1707.01836>
- [11] A. Darmawahyuni *et al.*, "Deep learning with a recurrent network structure in the sequence modeling of imbalanced data for ECG-rhythm classifier," *Algorithms*, vol. 12, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.3390/a12060118.
- [12] F. Karim, S. Majumdar, H. Darabi, and S. Chen, "LSTM Fully Convolutional Networks for Time Series Classification," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1662–1669, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2779939.
- [13] A. Isin and S. Ozdalili, "Cardiac arrhythmia detection using deep learning," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2017, pp. 268–275. doi: 10.1016/j.procs.2017.11.238.
- [14] G. A. Jandera, "Peningkatan Kinerja Delineasi Sinyal Elektrokardiogram Multi-Lead Berbasis Deep Learning," Universitas Sriwijaya, 2023.
- [15] R. N. S. Wandya, "Delineasi 12 - Lead Sinyal Electrocardiogram Berbasis Deep Learning untuk Pendeteksian ST Elevasi," Universitas Sriwijaya, 2024.
- [16] E. R. Vianti, "Klasifikasi Aritmia pada Sinyal Fetal ECG Berbasis Deep Learning," Universitas Sriwijaya, 2024.
- [17] W. Wu, Y. Huang, and X. Wu, "A New Deep Learning Method with Self-Supervised Learning for Delineation of the Electrocardiogram," *Entropy*, vol. 24, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/e24121828.
- [18] A. Darmawahyuni, S. Nurmaini, M. N. Rachmatullah, and V. Bhayyu, "Automated ECG Waveform Annotation Based on Stacked Long Short-Term Memory," *Computer Engineering and Applications*, vol. 9, no. 2, 2020.

- [19] X. Liu, H. Wang, Z. Li, and L. Qin, "Deep learning in ECG diagnosis: A review," *Knowl Based Syst*, vol. 227, p. 107187, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107187>.
- [20] Q. Xiao *et al.*, "Deep Learning-Based ECG Arrhythmia Classification: A Systematic Review," Apr. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/app13084964.
- [21] A. Peimankar and S. Puthusserypady, "DENS-ECG: A deep learning approach for ECG signal delineation," *Expert Syst Appl*, vol. 165, p. 113911, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113911>.
- [22] V. Vijayakumar, S. Ummar, T. J. Varghese, and A. E. Shibu, "ECG noise classification using deep learning with feature extraction," *Signal Image Video Process*, vol. 16, no. 8, pp. 2287–2293, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11760-022-02194-3.
- [23] M. Mohamed Suhail and T. Abdul Razak, "Cardiac disease detection from ECG signal using discrete wavelet transform with machine learning method," *Diabetes Res Clin Pract*, vol. 187, p. 109852, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2022.109852>.
- [24] N. and O. G. Moskalenko Viktor and Zolotykh, "Deep Learning for ECG Segmentation," in *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research III*, W. and R. V. and T. Y. Kryzhanovsky Boris and Dunin-Barkowski, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 246–254.
- [25] A. Darmawahyuni *et al.*, "Deep learning with a recurrent network structure in the sequence modeling of imbalanced data for ECG-rhythm classifier," *Algorithms*, vol. 12, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.3390/a12060118.
- [26] Kalyakulina, A., Yusipov, I., Moskalenko, V., Nikolskiy, A., Kosonogov, K., Zolotykh, N., & Ivanchenko, M. (2021). Lobachevsky University Electrocardiography Database (version 1.0.1). PhysioNet. <https://doi.org/10.13026/eeqm-h675>.