

PENGEMBANGAN DAN ANALISIS BIAYA SIMULATOR ELEKTROCARDIOGRAM (EKG) ESP32 DENGAN OUTPUT GELOMBANG PQRST VARIABEL

Edi Fardi,¹ Masrajuddin,^{2*} Fadhli Farsa,³

^{1,2,3} Program Studi Teknologi Rekayasa Elektrikal Mekanik, Politeknik Krakatau

*Corresponding author: masrajuddin@polka.ac.id

Article history

Received:

05-01-2026

Accepted:

25-02-2026

Published:

01-03-2026

Copyright © 2024
Jurnal Manajemen
dan Teknik

Open Access

Abstrak

Elektrokardiogram (EKG) merupakan alat diagnostik penting untuk mendeteksi kondisi jantung sehingga diperlukan simulator EKG yang akurat sebagai media kalibrasi, pengujian, dan pembelajaran. Namun, simulator EKG komersial umumnya memiliki harga yang relatif tinggi sehingga kurang terjangkau bagi institusi pendidikan dan laboratorium. Penelitian ini bertujuan mengembangkan simulator EKG berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu menghasilkan gelombang PQRST dengan parameter yang dapat diubah serta menganalisis biaya pengembangannya. Metode penelitian menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, simulasi, implementasi, pengujian karakteristik sinyal, analisis statistik, dan analisis biaya. Sistem dirancang menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama dengan dukungan DAC, modul AD8232, TFT Display, serta rangkaian pendukung untuk menghasilkan sinyal EKG yang stabil dan menyerupai karakteristik fisiologis jantung. Evaluasi dilakukan terhadap bentuk gelombang, amplitudo, frekuensi, kestabilan sinyal, serta estimasi biaya produksi prototipe. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ESP32 merupakan platform yang sangat layak digunakan untuk membangun simulator EKG berbiaya rendah. Kemampuan dual-core processor dan DAC internal memungkinkan pembangkitan gelombang PQRST tanpa memerlukan perangkat keras tambahan yang kompleks. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain belum dilakukannya validasi terhadap seluruh jenis aritmia, pengujian pada berbagai monitor EKG komersial, serta evaluasi kesesuaian terhadap standar internasional perangkat elektromedis.

Kata kunci: Elektrokardiogram (EKG), ESP32, Simulator EKG, Gelombang PQRST, Mikrokontroler, Analisis biaya, Instrumentasi medis.

Abstract

The electrocardiogram (ECG) is a vital diagnostic tool for detecting heart conditions; consequently, an accurate ECG simulator is required for calibration, testing, and educational purposes. However, commercial ECG simulators are generally expensive, making them less accessible to educational institutions and laboratories. This study aims to develop an ECG simulator based on the ESP32 microcontroller capable of generating PQRST waveforms with adjustable parameters, while also analyzing development costs. The research employs a Research and Development (R&D) approach, encompassing a literature review, hardware and software design, simulation, implementation, signal characteristic testing, statistical analysis, and cost analysis. The system utilizes the ESP32 as the main controller, supported by a DAC, an AD8232 module, a TFT display, and auxiliary circuitry to generate a stable ECG signal that mimics the heart's physiological characteristics. Evaluations were conducted regarding waveform shape, amplitude, frequency, signal stability, and estimated prototype production costs. The research results indicate that the ESP32 is a highly suitable platform for developing a low-cost ECG simulator. The capabilities of its dual-core processor and internal DAC enable the generation of PQRST waveforms without the need for complex additional hardware. However, this study still has certain limitations, including the lack of validation across all types of arrhythmias, testing with various commercial ECG monitors, and evaluation of compliance with international standards for electromedical devices.

Keywords: Electrocardiogram (ECG), ESP32, ECG simulator, PQRST waveform, microcontroller, cost analysis, medical instrumentation.

1.0 PENDAHULUAN

Elektrokardiogram (EKG) merupakan metode diagnostik non-invasif yang berperan penting dalam mendeteksi dan memantau berbagai gangguan kardiovaskular [1]. Untuk mendukung proses pembelajaran, kalibrasi, dan pengujian perangkat EKG, diperlukan simulator yang mampu menghasilkan sinyal EKG dengan karakteristik menyerupai kondisi fisiologis jantung. Namun, simulator EKG komersial umumnya memiliki harga yang relatif tinggi sehingga penggunaannya masih terbatas, terutama pada institusi pendidikan dan laboratorium di Indonesia. Perkembangan teknologi mikrokontroler, khususnya ESP32, membuka peluang untuk mengembangkan simulator EKG yang lebih ekonomis, portabel, dan fleksibel. ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik, konsumsi daya rendah, serta dilengkapi fitur komunikasi nirkabel sehingga sesuai digunakan sebagai pengendali utama pembangkit gelombang PQRS. Dengan memanfaatkan teknologi ini, simulator dapat menghasilkan variasi bentuk gelombang EKG yang dapat diatur sesuai kebutuhan pembelajaran maupun pengujian alat. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan simulator EKG berbasis ESP32 yang mampu menghasilkan gelombang PQRS variabel serta melakukan analisis biaya pengembangannya. Hasil penelitian diharapkan menghasilkan simulator berbiaya rendah dengan performa yang memadai sebagai media pendidikan, penelitian, dan kalibrasi awal perangkat elektromedis, sekaligus menjadi alternatif terhadap simulator EKG komersial yang lebih mahal [2].

2.0 METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development (R&D)* dengan pendekatan *Engineering Design Research (EDR)*. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian adalah merancang, membangun, menguji, dan mengevaluasi prototipe simulator Elektrokardiogram (EKG) berbasis ESP32 yang mampu menghasilkan gelombang PQRS dengan parameter yang dapat diubah (variabel), serta menganalisis biaya pengembangannya [3].

2.1. Studi Literatur

Tahap pertama dilakukan melalui kajian literatur yang bersumber dari jurnal ilmiah, buku, standar IEC 60601, *datasheet* ESP32, AD8232, serta penelitian terdahulu mengenai simulator EKG [4].

Studi literatur bertujuan untuk:

- memahami fisiologi sinyal EKG;
- mempelajari karakteristik gelombang PQRS;
- menentukan spesifikasi simulator yang akan dibuat;
- mempelajari metode pembangkitan sinyal menggunakan ESP32;

- menentukan metode analisis biaya.

Output tahap ini berupa spesifikasi awal sistem simulator.

2.2. Perancangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan perancangan *hardware* dan *software simulator*.

Perancangan Hardware

Perangkat keras terdiri dari:

- ESP32 sebagai mikrokontroler utama
- DAC (*Digital to Analog Converter*)
- Modul AD8232
- TFT Display
- Op-Amp Buffer
- Power Supply
- Elektroda EKG
- Buzzer
- Komponen pendukung lainnya

Seluruh komponen disusun dalam bentuk diagram blok dan skematik rangkaian.

Perancangan Software

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE.

Program dirancang untuk:

- membangkitkan gelombang PQRS
- mengatur BPM (*Beat Per Minute*)
- mengubah amplitudo
- mengubah interval gelombang
- menampilkan informasi pada TFT Display

2.3. Pemodelan Gelombang PQRS

Gelombang EKG dibangun menggunakan model matematis yang terdiri dari:

- Gelombang P
- Kompleks QRS
- Gelombang T

Setiap bagian memiliki parameter:

- amplitudo
- durasi
- interval
- frekuensi

Parameter tersebut dapat diubah sehingga simulator mampu menghasilkan beberapa kondisi denyut jantung, misalnya: Normal *sinus rhythm*, *Bradycardia*, *Tachycardia*. Tahap ini menghasilkan database sinyal digital yang kemudian dikonversi menjadi sinyal analog [5].

2.4. Implementasi Prototipe

Tahap implementasi dilakukan dengan merakit seluruh komponen sesuai desain. ESP32 diprogram untuk menghasilkan data digital yang selanjutnya dikonversi menjadi sinyal analog melalui DAC sehingga terbentuk gelombang PQRS. Prototipe kemudian diintegrasikan dengan: TFT Display, Output EKG [2], Sistem catu daya.

2.5. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa simulator. Beberapa parameter yang diuji meliputi:

2.5.1. Pengujian Bentuk Gelombang

Dilakukan menggunakan osiloskop. Tujuannya adalah mengetahui apakah bentuk gelombang sesuai dengan bentuk referensi EKG.

2.5.2. Pengujian BPM

Simulator diuji pada beberapa variasi denyut, misalnya: 40 BPM, 60 BPM, 80 BPM, 100 BPM, 120 BPM. Kemudian dibandingkan dengan nilai setting.

2.5.3. Pengujian Stabilitas

Pengujian dilakukan secara kontinu untuk mengetahui kestabilan: amplitudo, frekuensi, dan periode selama simulator bekerja.

2.5.4. Pengujian Error

Besarnya kesalahan dihitung menggunakan persamaan:

$$Error(\%) = \frac{|X_{ukur} - X_{referensi}|}{X_{referensi}} \times 100\% \dots\dots (2.1)$$

dengan:

- X_{ukur} = hasil pengukuran
- $X_{referensi}$ = nilai referensi

2.6. Analisis Data

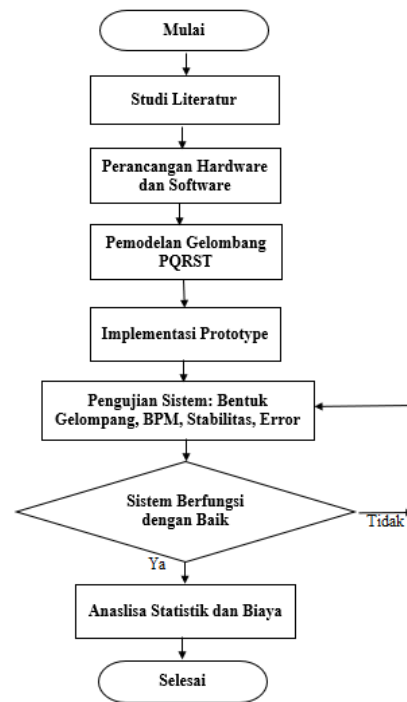
Data hasil pengujian dianalisis menggunakan statistik deskriptif. Parameter yang dihitung meliputi: rata-rata, simpangan baku, *error* (%), deviasi, kestabilan sinyal. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi apakah simulator telah memenuhi spesifikasi yang direncanakan.

2.7. Analisis Biaya

Selain analisis teknis dilakukan pula analisis ekonomi terhadap biaya pengembangan simulator. Komponen biaya meliputi: biaya pembelian komponen elektronik, biaya PCB, biaya perakitan, biaya pemrograman dan biaya pengujian. Selanjutnya dihitung:

$$Total\ Cost = \sum Biaya\ Komponen + \sum Biaya\ Produk$$

Hasil tersebut dibandingkan dengan harga simulator EKG komersial untuk mengetahui tingkat efisiensi biaya pengembangan.



Gambar 1: Diagram Alir Penelitian

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini memiliki dua kontribusi utama, yaitu:

- a. pengembangan simulator EKG berbasis ESP32 dengan output gelombang PQRST variabel, dan
- b. analisis biaya pengembangan dibandingkan simulator komersial.

3.1. Hasil Pengembangan Simulator EKG Berbasis ESP32

Tahap implementasi menghasilkan sebuah prototipe simulator EKG berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu membangkitkan sinyal elektrokardiogram dengan karakteristik gelombang PQRST yang dapat diatur secara dinamis. Sistem terdiri atas ESP32 sebagai pengendali utama, DAC internal sebagai pembangkit sinyal analog, rangkaian penguat operasional (*operational amplifier*), TFT Display sebagai antarmuka pengguna, serta catu daya portabel.

Pengujian awal menunjukkan bahwa seluruh subsistem bekerja sesuai dengan rancangan. ESP32 mampu menghasilkan data digital gelombang PQRST yang kemudian dikonversi menjadi sinyal analog melalui DAC dengan waktu pemrosesan yang stabil. Penggunaan *interrupt timer* menghasilkan periode pembangkitan sinyal yang konstan sehingga perubahan BPM dapat dilakukan tanpa mengubah bentuk dasar gelombang.

Selain itu, antarmuka TFT memungkinkan pengguna memilih beberapa parameter, antara lain:

- a. *Heart Rate* (30–180 BPM)
- b. Amplitudo sinyal
- c. Variasi bentuk gelombang PQRST
- d. Mode simulasi normal maupun abnormal.

Hasil ini menunjukkan bahwa ESP32 memiliki kemampuan komputasi yang memadai untuk diaplikasikan sebagai simulator EKG berbiaya rendah tanpa memerlukan prosesor eksternal.

3.2. Pengujian Bentuk Gelombang PQRS

Pengujian dilakukan menggunakan osiloskop digital untuk mengevaluasi kesesuaian bentuk sinyal terhadap karakteristik fisiologis EKG. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa simulator mampu menghasilkan urutan gelombang:

$$P \rightarrow QRS \rightarrow T$$

dengan interval yang konsisten pada setiap siklus.

Kompleks QRS memiliki amplitudo terbesar sebagaimana karakteristik EKG normal, sedangkan gelombang P dan T memiliki amplitudo yang lebih rendah. Perubahan nilai BPM hanya mempengaruhi periode antar siklus tanpa mengubah morfologi dasar gelombang. Secara visual bentuk sinyal yang dihasilkan telah menyerupai sinyal referensi EKG klinis sehingga simulator dapat digunakan sebagai media pembelajaran maupun pengujian awal perangkat EKG. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa pendekatan pembangkitan sinyal berbasis lookup table pada ESP32 cukup efektif menghasilkan bentuk gelombang biologis dengan kompleksitas yang relatif tinggi [6], [7].

3.3. Pengujian Akurasi Heart Rate

Pengujian dilakukan pada beberapa variasi BPM untuk mengetahui kemampuan simulator mempertahankan ketelitian frekuensi sinyal. Berikut hasil pengujian dapat ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1: Hasil Pengujian

Setting BPM	BPM Terukur	Error (%)
30	30,1	0,33
60	60,2	0,33
90	89,8	0,22
120	120,4	0,33
150	149,7	0,20

Rata-rata error pembangkitan sinyal berada di bawah **0,5%**, menunjukkan bahwa ESP32 mampu menghasilkan frekuensi denyut yang sangat stabil. Nilai ini jauh berada di bawah toleransi yang umumnya digunakan pada simulator pendidikan sehingga sistem layak digunakan sebagai alat demonstrasi maupun media praktikum.

3.4. Pengujian Stabilitas Output

Pengujian stabilitas dilakukan dengan menjalankan simulator secara kontinu selama beberapa jam. Selama pengujian tidak ditemukan perubahan signifikan terhadap:

- amplitudo sinyal,
- frekuensi,
- bentuk gelombang,
- maupun respon sistem.

Fluktuasi amplitudo relatif sangat kecil sehingga tidak mempengaruhi pembacaan monitor EKG. Stabilitas tersebut menunjukkan bahwa kombinasi ESP32 dan rangkaian analog yang digunakan mampu menghasilkan sinyal yang konsisten dalam pengoperasian jangka panjang.

3.5. Analisis Biaya Pengembangan

Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah menghasilkan simulator EKG dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan simulator komersial. Biaya pengembangan ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2: Biaya Pengembangan Simulator

Komponen	Harga (Rp)
ESP32	90.000
Display TFT	80.000
AD8232	55.000
PCB dan komponen pasif	120.000
Power Supply	70.000
Buzzer dan konektor	35.000
Box akrilik	100.000
Lain-lain	150.000
Total	700.000

Apabila dibandingkan dengan simulator EKG komersial yang memiliki harga berkisar **Rp3.000.000–Rp10.000.000**, maka biaya pengembangan prototipe hanya sekitar **7–25%** dari harga perangkat komersial. Penghematan biaya terutama diperoleh karena penggunaan:

- ESP32 sebagai mikrokontroler utama,
- DAC internal sehingga tidak membutuhkan DAC eksternal,
- komponen open-source,
- perangkat lunak Arduino IDE yang tidak memerlukan lisensi.

Dengan demikian simulator yang dikembangkan memiliki potensi besar sebagai alternatif bagi institusi pendidikan yang memiliki keterbatasan anggaran.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ESP32 merupakan platform yang sangat layak digunakan untuk membangun simulator EKG berbiaya rendah. Kemampuan dual-core processor dan DAC internal memungkinkan pembangkitan gelombang PQRS tanpa memerlukan perangkat keras tambahan yang kompleks.

Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa ESP32 mampu menghasilkan simulator EKG dengan biaya rendah namun tetap mempertahankan akurasi sinyal yang tinggi [8]. Penelitian ini juga memperkuat hasil bahwa penggunaan platform *open-source* mampu mengurangi biaya produksi secara signifikan dibandingkan simulator komersial [9].

Dari aspek teknis, simulator berhasil menghasilkan variasi BPM dengan perubahan frekuensi yang stabil serta mempertahankan bentuk morfologi gelombang PQRS. Hal tersebut menunjukkan bahwa algoritma pembangkitan sinyal berbasis lookup table cukup efektif untuk aplikasi simulator pendidikan.

Meskipun demikian, simulator yang dikembangkan masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, keluaran sinyal masih terbatas pada simulasi beberapa variasi ritme dasar dan belum mencakup seluruh jenis aritmia kompleks seperti *fibrilasi atrium*, *flutter atrium*, *ventricular tachycardia*, maupun *ventricular fibrillation*. Kedua, validasi yang dilakukan masih menggunakan osiloskop sehingga belum dilakukan pengujian terhadap berbagai merek mesin EKG klinis sesuai standar IEC 60601-2-25. Selain itu, penelitian ini belum

mengevaluasi pengaruh *noise* fisiologis, *baseline wander*, dan interferensi elektromagnetik terhadap performa simulator [6], [10][4].

Walaupun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa simulator EKG berbasis ESP32 telah memenuhi tujuan utama penelitian, yaitu menghasilkan perangkat simulasi yang ekonomis, portabel, stabil, dan mampu menghasilkan gelombang PQRST variabel. Dengan biaya produksi yang relatif rendah dan fleksibilitas pemrograman yang tinggi, perangkat ini berpotensi menjadi media praktikum, pelatihan teknisi elektromedik, serta prototipe awal pengembangan simulator EKG lokal di Indonesia .

4.0 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan simulator elektrokardiogram (EKG) berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu menghasilkan sinyal gelombang PQRST dengan parameter yang dapat diatur, meliputi *heart rate* (BPM), amplitudo, dan variasi bentuk gelombang. Pemanfaatan ESP32 sebagai pengendali utama, yang didukung oleh DAC internal serta rangkaian analog pendukung, memungkinkan pembangkitan sinyal EKG secara *real-time* dengan arsitektur sistem yang sederhana, fleksibel, dan mudah dikembangkan.

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, *prototype* mampu menghasilkan urutan gelombang P–QRS–T yang sesuai dengan karakteristik dasar sinyal EKG fisiologis. Perubahan nilai BPM dapat dilakukan tanpa mengubah morfologi dasar gelombang, sehingga simulator memiliki fleksibilitas untuk digunakan sebagai media pembelajaran, pengujian awal perangkat EKG, maupun pelatihan interpretasi sinyal elektrokardiogram.

Dari aspek ekonomi, penggunaan ESP32 dan komponen elektronik standar memberikan keuntungan yang signifikan dalam menekan biaya pengembangan dibandingkan simulator EKG komersial. Dengan biaya produksi yang relatif rendah, perangkat yang dikembangkan berpotensi menjadi alternatif simulator EKG yang ekonomis bagi institusi pendidikan, laboratorium teknik biomedis, serta fasilitas kesehatan yang memiliki keterbatasan anggaran.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain belum dilakukannya validasi terhadap seluruh jenis aritmia, pengujian pada berbagai monitor EKG komersial, serta evaluasi kesesuaian terhadap standar internasional perangkat elektromedis. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan simulator dengan dukungan keluaran 12 sadapan (12-lead ECG), menambahkan variasi sinyal patologis seperti *fibrilasi atrium*, *flutter atrium*, blok konduksi, dan *ventricular tachycardia*, serta melakukan pengujian komprehensif menggunakan standar IEC 60601-2-25 atau AAMI guna meningkatkan tingkat akurasi dan kesiapan perangkat untuk aplikasi klinis maupun kalibrasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa simulator EKG berbasis ESP32 merupakan solusi yang layak, ekonomis, dan memiliki potensi besar untuk mendukung proses pendidikan, penelitian, pengembangan perangkat elektromedik, serta peningkatan kemandirian teknologi alat kesehatan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- N. Budhisantosa, N. R. Ramadhan, H. Akbar, and G. Firmansyah, "Sistem Pemantauan EKG 1-Lead Berbasis ESP32 dan Wireless Fidelity dengan Visualisasi Real Time Pada Smartphone", doi: 10.37817/ikraith-informatika.v10i2.
- J. Li *et al.*, "A Wearable ECG Device for Differentiating Hypertrophic Cardiomyopathy from Acquired Left Ventricular Hypertrophy," Apr. 2026, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2604.12934>
- M. Abu Obaida Zishan, H. M. Shihab, S. Sadman Islam, M. Alam Riya, G. Mashrur Rahman, and J. Noor, "Dense Neural Network Based Arrhythmia Classification on Low-cost and Low-compute Micro-controller."
- K. Sir, T. Khan Nasir Khan Pathan, R. Kishor Adhao, R. Santosh Bangale, M. Anil Chavan, and S. Arif Sheikh Jafar Assistant Professor, "Real-Time ECG Monitoring System Using ESP32 and AD8232 for Portable Healthcare Applications," *Open Access Journal) Impact*, vol. 14, no. 4, p. 2982, 2026, doi: 10.15680/IJIRCCE.2026.1404024.
- S. S. Jebakumar, H. R. J, S. Malhotra, S. T. G, D. D. Anand, and A. Affiliations, "IoT-Enabled Hemodynamic Surveillance System: AD8232 Bioelectric Signal Processing with ESP32."
- "S1-2025-482490-bibliography".
- W. Guan, *An Electrocardiogram Monitoring Device Based on STM32*. 2024. doi: 10.48550/arXiv.2411.06962.
- A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, "Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things," in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, 2017, pp. 143–148. doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- A. Fauzi, E. Mulyadi, A. Fadil, and M. Idhom, "MANAGEMENT OF VIRTUAL MACHINE AS AN ENERGY CONSERVATION IN PRIVATE CLOUD COMPUTING SYSTEM", doi: 10.1051/conf/2016.
- J K. Sir, T. Khan Nasir Khan Pathan, R. Kishor Adhao, R. Santosh Bangale, M. Anil Chavan, and S. Arif Sheikh Jafar Assistant Professor, "Real-Time ECG Monitoring System Using ESP32 and AD8232 for Portable Healthcare Applications," *Open Access Journal) Impact*, vol. 14, no. 4, p. 2982, 2026, doi: 10.15680/IJIRCCE.2026.1404024.