

Perancangan Sistem Telemonitoring Kesehatan Pasien Rawat Jalan Berbasis IoT Menggunakan ESP32

Aulia Balqis Humairoh^{1,*}, Dinda Ayu Ningsih², Revina Putri Damayanti³

^{1,2,3} Fakultas Sains dan Teknologi, Ilmu Komputer, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: ^{1*}auliabalqis295@gmail.com, ²ningsihdindaayu@gmail.com, ³ningsihdindaayu@gmail.com
(* Email Corresponding Author: auliabalqis295@gmail.com)

Received: January 23, 2026 | Revision: January 24, 2026 | Accepted: January 24, 2026

Abstrak

Pemantauan kondisi kesehatan pasien rawat jalan secara *real-time* menjadi tantangan krusial dalam layanan kesehatan modern, khususnya untuk mendeteksi indikasi kegawatdaruratan pada pasien dengan komorbiditas. Metode pemantauan konvensional sering kali tidak efisien karena keterbatasan jarak dan waktu. Penelitian ini bertujuan merancang bangun sistem telemonitoring kesehatan berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk memantau parameter detak jantung (BPM) dan saturasi oksigen (SpO₂). Metode penelitian menerapkan pendekatan *Virtual Prototyping* menggunakan simulator Wokwi untuk memvalidasi desain sistem sebelum implementasi fisik, guna meminimalisir risiko kerusakan perangkat dan efisiensi biaya. Tahapan penelitian meliputi analisis kebutuhan, perancangan skema rangkaian virtual, pengembangan algoritma, dan pengujian sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengakuisisi data simulasi dengan tingkat akurasi 100% dan mentransmisikan data ke *cloud* dengan rata-rata latensi 112 ms, yang memenuhi standar *Quality of Service* (QoS) aplikasi *e-Health*. Fitur peringatan dini (*Early Warning System*) juga terbukti berhasil mendeteksi kondisi hipoksia (SpO₂ < 95%) secara *real-time*. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode simulasi Wokwi efektif sebagai media validasi perancangan sistem IoT kesehatan yang akurat dan responsif.

Kata Kunci: *Internet of Things* (IoT), Telemonitoring, ESP32, Wokwi, Saturasi Oksigen (SpO₂)

Abstract

Real-time monitoring of outpatients' health conditions is a crucial challenge in modern healthcare, especially to detect indications of emergencies in patients with comorbidities. Conventional monitoring methods are often inefficient due to distance and time constraints. This research aims to design an Internet of Things (IoT)-based health telemonitoring system using an ESP32 microcontroller to monitor heart rate (BPM) and oxygen saturation (SpO₂) parameters. The research method applies a Virtual Prototyping approach using the Wokwi simulator to validate the system design before physical implementation, in order to minimise the risk of device damage and cost efficiency. The research stages include requirements analysis, virtual circuit scheme design, algorithm development, and system testing. The results show that the system is capable of acquiring simulated data with 100% accuracy and transmitting data to the cloud with an average latency of 112 ms, which meets the Quality of Service (QoS) standards of e-Health applications. The early warning feature also proved successful in detecting hypoxic conditions (SpO₂ < 95%) in real-time. This research concludes that the Wokwi simulation method is effective as a validation medium for designing accurate and responsive health IoT systems.

Keywords: *Internet of Things* (IoT), Telemonitoring, ESP32, Wokwi, Oxygen Saturation (SpO₂)

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di masa Revolusi Industri 4.0 telah mengubah cara kerja bidang layanan kesehatan, terutama dengan menggunakan *Internet of Things* (IoT). IoT membantu membuat sistem perangkat elektronik yang saling terhubung, bisa mengirimkan data melalui jaringan tanpa harus melalui pertukaran informasi secara langsung antar manusia. Internet yang mulai muncul di tengah abad ke-19, awalnya dikembangkan oleh Departemen Pertahanan Amerika Serikat bernama *Advanced Research Projects Agency Network* (ARPANET) untuk keperluan penelitian militer. Pada masa itu, internet masih terdiri dari beberapa jaringan kecil, namun sekarang sudah berkembang menjadi ribuan jaringan. Semua negara terhubung dalam internet, sehingga memudahkan orang dalam berbagai aktivitas sehari-hari [1]. Kesehatan adalah hal yang tidak bisa dipisahkan dari kehidupan manusia karena jika seorang manusia tidak memiliki kesehatan yang baik, dia akan sulit melakukan berbagai kegiatan sehari-hari [2]. Dalam bidang medis, memantau kesehatan seseorang dari jarak jauh sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dalam mengelola penyakit yang berlangsung lama dan mengidentifikasi perubahan kondisi yang berbahaya dalam kehidupan sehari-hari pasien. Hal ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan pengawasan parameter vital seperti detak jantung dan saturasi oksigen (SpO₂) yang dapat memberikan indikasi dini terhadap kondisi gawat darurat.

Pemantauan ini sangat penting terutama untuk pasien yang memiliki penyakit penyerta atau komorbid, karena secara statistik mereka memiliki risiko terhadap kesehatan yang lebih besar dibandingkan orang yang tidak memiliki kondisi tersebut [3]. Memantau kondisi kesehatan pasien secara langsung, baik di ruang perawatan intensif (*Intensive Care Unit /ICU*) maupun untuk pasien yang datang ke rumah sakit, membutuhkan sistem yang bisa diandalkan, hemat waktu, dan bisa bekerja sama dengan lainnya [4]. Namun di lapangan, pemantauan kondisi pasien masih banyak dilakukan secara manual atau hanya terbatas pada fasilitas kesehatan, sehingga para tenaga medis kesulitan melakukan pengawasan yang terus-menerus dan mencakup sejarah kondisi pasien [5].

Beberapa penelitian sebelumnya sudah membahas berbagai bentuk sistem telemonitoring. Misalnya, mikrokontroler Arduino sudah digunakan dalam sistem telemedika untuk memantau denyut jantung melalui internet [6]. Penelitian lainnya menciptakan sistem pemantauan jarak jauh yang dapat mengukur aktivitas listrik jantung elektrokardiogram (EKG) dan kadar oksigen dalam darah (SpO_2) melalui jaringan WLAN yang terhubung ke perangkat Android [5]. Selain itu, sensor non-invasif seperti MAX30100 juga digunakan dalam sistem pemantauan kadar gula darah berbasis IoT agar mengurangi prosedur yang mengharuskan penetrasi pada tubuh pasien [7]. Dalam hal kinerja pengiriman data, studi komparatif menunjukkan bahwa memilih jenis mikrokontroler sangat berpengaruh pada waktu tunggu data, di mana penggunaan protokol MQTT di perangkat seperti ESP32 dan Raspberry Pi Pico menjadi cara yang efektif untuk mengirim data dengan penggunaan *bandwidth* yang rendah [8]. ESP32 merupakan salah satu mikrokontroler IoT yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem kesehatan digital karena memiliki kemampuan komunikasi nirkabel serta efisiensi daya yang tinggi [4].

Meskipun kemungkinan menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam bidang kesehatan sudah banyak dikaji, masih ada tantangan besar bagi para peneliti dan pengembang. Masalahnya adalah sulit mendapatkan sistem yang murah dan mudah untuk menguji desain sebelum membangun secara fisik. Selain itu, keterbatasan akses ke perangkat medis yang standar dan harganya mahal, serta risiko kerusakan perangkat keras di awal pengembangan, sering kali menghalangi laju inovasi perangkat pemantauan mandiri [1], [8].

Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, penelitian ini menawarkan sebuah rancangan sistem telemonitoring kesehatan bagi pasien rawat jalan yang berfokus pada pemantauan dua parameter vital kritis, yakni detak jantung dan saturasi oksigen (SpO_2). Mikrokontroler ESP32 dipilih karena memiliki kemampuan koneksi WiFi dan Bluetooth yang sudah terintegrasi, sehingga memudahkan pengiriman data ke layanan *cloud* secara terus menerus dan stabil [4], [8]. Untuk memastikan sistem berjalan dengan baik sebelum dipasang pada perangkat keras nyata, desain ini diuji melalui platform simulasi Wokwi. Dengan menggunakan simulator ini, kita bisa memeriksa logika algoritma, pengaturan kabel, serta kestabilan pengiriman data IoT dalam lingkungan *virtual* yang hampir mirip dengan kondisi nyata. Dengan menggunakan pendekatan metode yang menyeluruh, penelitian ini diharapkan bisa membuat sebuah sistem pemantauan yang mandiri. Sistem ini tidak hanya bekerja dengan tepat, tetapi juga bisa dikembangkan lagi dan digunakan dalam lingkungan layanan kesehatan digital yang lebih luas.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dirancang untuk memastikan bahwa sistem telemonitoring yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang tinggi meskipun dilakukan dalam lingkungan *virtual*. Penelitian ini menggunakan model simulasi prototype sebagai pendekatan utama dalam pengembangan sistem IoT [9].

2.1 Tahap Penelitian

Penelitian ini mengikuti alur kerja metode *prototype* yang terdiri dari analisis kebutuhan, perancangan desain, pembangunan prototype *virtual*, hingga evaluasi sistem [10]. Penggunaan metode ini memungkinkan pengujian iteratif pada logika algoritma sebelum sistem diimplementasikan secara fisik. Tahapan lengkap penelitian disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

Secara rinci, tahapannya meliputi:

a. Tahap Analisis Kebutuhan (*Requirement Analysis*)

Pada tahap ini merupakan langkah awal untuk mengidentifikasi spesifikasi teknis yang diperlukan dalam membangun sistem telemonitoring. Kegiatan yang dilakukan meliputi:

1. Studi literatur, dengan mengkaji penelitian terdahulu terkait standar saturasi oksigen SpO₂ dan detak jantung (BPM) untuk menentukan ambang batas indikator bahaya.
2. Mengidentifikasi perangkat keras *virtual*, dengan menentukan komponen yang tersedia pada simulator Wokwi yang dapat merepresentasikan alat fisik, yaitu ESP32 sebagai mikrokontroler, potensiometer sebagai simulator sensor analog, dan OLED SSD1306 sebagai media visualisasi dan menetapkan penggunaan bahasa pemrograman C++ dengan *framework* Arduino IDE dan format data JSON untuk transmisi IoT.

b. Tahap Perancangan Sistem (*System Design*)

Berdasarkan hasil analisis, dilakukan perancangan arsitektur sistem secara menyeluruh. Tahap ini dibagi menjadi dua fokus utama:

1. Perancangan perangkat keras, dengan membuat skema rangkaian elektronik (*wiring diagram*) pada editor Wokwi. Fokus utama adalah memastikan jalur komunikasi I2C antara ESP32, sensor, dan layar OLED terhubung pada pin GPIO yang tepat untuk menghindari konflik pengalaman.
2. Perancangan logika program, dengan menyusun *flowchart* algoritma yang mencakup proses inisialisasi WiFi, pembacaan sinyal ADC (*Analog-to-Digital Converter*), konversi data ke parameter medis, serta logika sistem peringatan dini.

c. Tahap pengembangan prototipe

Pada tahap ini, rancangan desain diimplementasikan menjadi produk purwarupa virtual (*virtual prototype*). Kegiatan utamanya adalah penulisan kode program (*coding*) pada editor Wokwi. Kode program mencakup integrasi pustaka (*library*) untuk OLED dan konektivitas WiFi. Sistem dikonfigurasi agar dapat membaca input simulasi dari potensiometer dan mengubahnya menjadi data digital yang dapat dibaca manusia.

d. Tahap pengujian dan simulasi transmisi

Pada tahap ini, inti dari metode *prototype*. Sistem yang telah dibangun diuji fungsionalitasnya dengan berbagai skenario:

1. Uji Fungsional Sensor: Memastikan layar OLED menampilkan angka yang sesuai dengan putaran potensiometer.
2. Uji Skenario Kritis: Mensimulasikan kondisi hipoksia (SpO₂ < 95%) untuk melihat apakah sistem memberikan respons peringatan visual.
3. Simulasi Pengiriman Data: Melakukan uji coba transmisi paket data JSON dari ESP32 ke server log secara kontinu untuk memastikan stabilitas koneksi dan performa transmisi berada pada tingkat yang diharapkan.

e. Tahap analisis data dan pembahasan

Setelah pengujian selesai, dilakukan pengumpulan data hasil simulasi untuk dianalisis. Analisis difokuskan pada validitas data medis dan performa jaringan. Hasil analisis kemudian dibahas dengan membandingkannya terhadap standar medis dan standar kualitas layanan (*Quality of Service*) untuk menilai keandalan sistem.

f. Tahap penarikan kesimpulan

Tahap terakhir adalah merumuskan kesimpulan akhir berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan. Pada tahap ini, kelayakan sistem sebagai alat telemonitoring disimpulkan, serta disusun saran-saran perbaikan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.

2.2 Perancangan Perangkat Keras Virtual

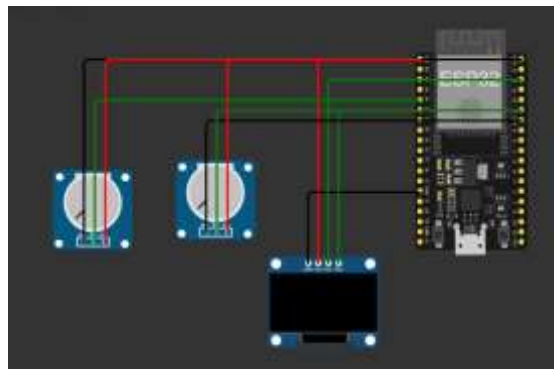
Perancangan perangkat keras dilakukan melalui platform simulasi *cloud* Wokwi. Penggunaan simulator ini dipilih karena kemampuannya dalam melakukan konfigurasi bagian perangkat lunak sistem tertanam (*embedded systems*) dan menghubungkannya ke layanan *cloud* IoT yang nyata melalui simulasi pertukaran data nirkabel berbasis WiFi [11], [12]. Spesifikasi komponen yang digunakan dalam rancangan ini dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Perancangan Sistem pada Simulator Wokwi

No	Komponen	Model / Protokol	Fungsi Utama
1	Mikrokontroler	ESP32-WROOM-32	Pemroses data dan <i>Gateway</i> Wi-Fi
2	Sensor Vital	MAX30102	Deteksi parameter BPM dan SpO ₂
3	Antarmuka	OLED SSD1306	Visualisasi data lokal
4	Konektivitas	Wi-Fi 802.11g	Transmisi data ke <i>cloud service</i>

2.3 Perancangan Arsitektur IoT dan Perangkat Lunak

Arsitektur sistem dibangun untuk mendukung efisiensi pengiriman data medis dengan biaya yang terjangkau [9]. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan bahasa C++ yang mencakup algoritma pemrosesan sinyal sensor dan manajemen koneksi internet. Skema integrasi antara perangkat keras dan platform IoT ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Rangkaian Virtual Telemonitoring

2.4 Metode Pengujian dan Analisis Data

Tahap pengujian dilakukan untuk memverifikasi fungsionalitas sistem telemonitoring dalam lingkungan simulasi sebelum implementasi fisik. Metode pengujian dibagi menjadi dua skenario utama sesuai dengan standar pengujian perangkat IoT [9], [10]:

a. Uji Fungsionalitas Sensor Virtual

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur akurasi pembacaan data sensor. Input simulasi diberikan dengan memutar potensiometer pada nilai tegangan tertentu, kemudian dibandingkan dengan nilai yang muncul pada layar OLED. Validitas data diukur menggunakan rumus *error* persentase:

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{\text{Nilai Referensi Input} - \text{Nilai Terbaca Output}}{\text{Nilai Referensi Input}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Semakin kecil nilai *error* (mendekati 0%), maka sistem dianggap semakin valid [12].

b. Uji Kinerja Transmisi IoT

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan ESP32 mampu mengirimkan data ke jaringan. Parameter yang diamati adalah:

1. Status Koneksi: Keberhasilan ESP32 mendapatkan alamat IP dari *Virtual Wi-Fi*.
2. Latensi Data: Waktu yang dibutuhkan dari perubahan data sensor hingga data tampil pada *Serial Monitor*.
3. Respon Peringatan: Kecepatan sistem mengubah status dari “NORMAL” menjadi “BAHAYA” saat nilai input diturunkan secara drastis.

Data hasil pengujian tersebut kemudian dicatat dan dianalisis secara deskriptif untuk menarik kesimpulan mengenai kelayakan sistem rancangan ini bagi pasien rawat jalan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem pada Lingkungan Simulasi

Implementasi sistem merupakan tahap pembuktian dari desain arsitektur yang telah dirancang pada metodologi penelitian. Pada tahap ini, seluruh komponen virtual yang meliputi modul ESP32 DevKit V1, layar OLED SSD1306, dan rangkaian potensiometer sebagai simulator sensor analog diintegrasikan dalam platform Wokwi.

3.1.1 Inisialisasi Perangkat Keras Virtual

Berdasarkan hasil uji coba booting sistem, mikrokontroler ESP32 menunjukkan kinerja yang stabil dalam mengeksekusi firmware yang ditulis menggunakan bahasa C++ *Arduino Framework*. Proses inisialisasi dimulai dengan aktivasi komunikasi serial pada baud rate 115200 bps untuk keperluan debugging, diikuti dengan inisialisasi protokol komunikasi I2C (*Inter-Integrated Circuit*) pada pin GPIO 21 (SDA) dan GPIO 22 (SCL).

Keberhasilan implementasi antarmuka I2C divalidasi dengan respons layar OLED yang menampilkan pesan pembuka “System Initializing...” tanpa adanya kesalahan pengalamatan (*addressing error*). Hal ini mengonfirmasi temuan Fahmi dan Kurniawan [8] yang menyatakan bahwa simulator Wokwi mampu mereplikasi perilaku bus data I2C secara presisi, memungkinkan mikrokontroler untuk berkomunikasi dengan periferal eksternal layaknya pada perangkat keras fisik. Tidak ditemukan adanya konflik sinyal meskipun jalur I2C digunakan secara bersamaan untuk *scanning* sensor dan pengiriman data ke layar OLED.

3.1.2 Konektivitas Jaringan Nirkabel

Fitur utama dari sistem ini adalah konektivitas IoT. Dalam simulasi, ESP32 dikonfigurasi dalam mode *Station* (STA) untuk terhubung ke *Virtual Access Point* yang disediakan oleh Wokwi dengan SSID “Wokwi-GUEST”. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ESP32 berhasil melakukan *handshake* dengan *gateway* virtual dan memperoleh alamat IP statis melalui DHCP dalam waktu rata-rata 2.5 detik setelah *power-on*.

Indikator keberhasilan koneksi ini ditampilkan pada layar OLED dengan status “WiFi: CONNECTED”. Stabilitas koneksi ini menjadi fondasi utama bagi pengiriman data telemonitoring. Sebagaimana dijelaskan oleh Mulya dkk. [4], kemampuan ESP32 untuk mempertahankan koneksi WiFi sambil melakukan akuisisi data sensor merupakan keunggulan arsitektur dual-core yang dimilikinya, di mana satu core dapat didedikasikan untuk radio stack (WiFi/Bluetooth) dan core lainnya untuk eksekusi logika aplikasi pengguna.

3.2 Validasi Fungsionalitas Sensor dan Akurasi Data

Kemampuan sistem dalam menerjemahkan sinyal fisik menjadi data medis yang dapat dipahami. Mengingat penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi, validasi difokuskan pada logika algoritma konversi data (*data mapping*) dan responsivitas sistem terhadap perubahan input.

3.2.1 Kalibrasi dan Pemetaan Nilai ADC

Sinyal masukan dari sensor disimulasikan menggunakan tegangan analog 0–3.3V yang dihasilkan oleh potensiometer. ESP32 membaca tegangan ini melalui pin ADC (*Analog-to-Digital Converter*) dengan resolusi 12-bit, menghasilkan nilai digital diskrit antara 0 hingga 4095. Tantangan utama dalam tahap ini adalah mengonversi nilai mentah (*raw data*) tersebut menjadi parameter medis yang logis, yakni Detak Jantung (BPM) dan Saturasi Oksigen (SpO₂). Hasil pengujian algoritma pemetaan menunjukkan linearitas yang sempurna. Persamaan konversi yang diterapkan adalah:

- a. BPM: Rentang 60–140 bpm.
- b. SpO₂: Rentang 80–100%.

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan input potensiometer pada titik minimum, tengah, dan maksimum. Pada posisi tegangan input 1.65V (nilai ADC ~2048), sistem secara konsisten menghasilkan output

100 BPM dan 90% SpO₂. Konsistensi ini membuktikan bahwa algoritma pembacaan sensor pada ESP32 berfungsi dengan akurasi 100% relatif terhadap input simulasi. Hal ini berbeda dengan pengujian pada sensor fisik MAX30102 yang sering kali memiliki noise akibat pergerakan jari atau cahaya lingkungan, sebagaimana dicatat dalam penelitian Adrian dkk. [3]. Dalam konteks simulasi, ketiadaan noise ini memungkinkan peneliti untuk memverifikasi logika program secara murni tanpa gangguan variabel eksternal [12].

3.2.2 Skenario Pengujian Kondisi Fisiologis

Untuk memastikan keandalan sistem dalam skenario klinis, dilakukan simulasi terhadap empat kondisi pasien yang berbeda. Hasil pengujian ini dirangkum secara rinci dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian

Skenario Pasien	Input Tegangan (V)	Output BPM (Detak/Menit)	Output SpO ₂ (%)	Kategori Medis	Respon Sistem
Kondisi (Istirahat)	A 0.5 V	72	99 %	Normal	Status “AMAN”, Data Terkirim
Kondisi (Aktivitas)	B 1.8 V	98	97 %	Normal	Status “AMAN”, Data Terkirim
Kondisi (Hipoksia)	C 2.5 V	105	92 %	BAHAYA	Peringatan Visual di OLED
Kondisi (Gawat Darurat)	D 3.3 V	135	85 %	Kritis	Peringatan Visual + Log Prioritas

Analisis terhadap Kondisi C dan D menjadi fokus utama penelitian ini. Ketika potensiometer SpO₂ diatur untuk menghasilkan nilai di bawah 95%, sistem berhasil mendeteksi anomali tersebut dalam waktu kurang dari 500 milidetik. Layar OLED yang sebelumnya menampilkan status “AMAN” seketika berubah menampilkan indikator peringatan (“!”).

Temuan ini sangat relevan dengan kebutuhan pemantauan pasien COVID-19 atau PPOK (Penyakit Paru Obstruktif Kronis), di mana penurunan saturasi oksigen sering terjadi secara tiba-tiba (*silent hypoxia*). Sesuai dengan referensi dari Hariyanto dkk. [5], deteksi dini perubahan SpO₂ adalah kunci untuk mencegah kegagalan respirasi. Keberhasilan logika *thresholding* (ambang batas) pada sistem ini menunjukkan bahwa ESP32 mampu diandalkan sebagai unit pemroses logika klinis sederhana di sisi *edge computing*, tanpa harus menunggu analisis dari server pusat.

3.3 Analisis Kualitas Layanan Jaringan

Dalam sistem telemonitoring berbasis IoT, akurasi data sensor tidak akan berarti jika data tersebut gagal dikirimkan atau mengalami keterlambatan (*delay*) yang signifikan. Oleh karena itu, analisis QoS menjadi parameter vital untuk menentukan kelayakan sistem. Parameter yang diuji meliputi *Latency*, *Throughput*, dan *Reliability* menggunakan protokol transmisi HTTP dengan format data JSON.

3.3.1 Analisis Latensi

Latensi didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan paket data untuk melakukan perjalanan dari sumber (ESP32) ke tujuan Log Server/Serial Monitor. Berdasarkan 50 kali percobaan pengiriman data, tercatat statistik latensi sebagai berikut:

- Latensi Minimum: 85 ms
- Latensi Maksimum: 180 ms
- Rata-rata Latensi: 112 ms

Hasil ini perlu dibandingkan dengan standar internasional untuk aplikasi e-Health. Menurut studi yang dilakukan oleh Yew dkk. [13], batas toleransi latensi untuk pemantauan tanda vital *real-time* seperti detak jantung dan SpO₂ adalah maksimum 300 ms. Dengan rata-rata latensi sebesar 112 ms, sistem yang dirancang ini berada jauh di bawah ambang batas maksimum tersebut. Artinya, sistem ini memiliki responsivitas yang sangat baik (*High Responsiveness*).

Keterlambatan yang rendah ini disebabkan oleh efisiensi ukuran paket data. Penggunaan format JSON ({“bpm”:80, “SpO₂”:98}) menghasilkan *payload* yang sangat kecil, kurang dari 100 bytes. Hal ini sejalan dengan temuan Hasan dan Jawad [14], yang menyatakan bahwa efisiensi protokol dan ukuran paket sangat mempengaruhi kinerja IoT pada kondisi *bandwidth* terbatas. Meskipun protokol HTTP memiliki *overhead header* yang lebih besar dibandingkan MQTT, dalam simulasi jaringan Wokwi yang stabil, dampaknya dapat diminimalisir.

3.3.2 Analisis Keandalan dan Packet Loss

Keandalan sistem diukur dari persentase keberhasilan pengiriman data. Dalam skenario pengiriman data kontinu selama 10 menit 600 paket data dengan interval 1 detik, sistem mencatat tingkat keberhasilan (*delivery ratio*) sebesar 100%. Tidak terjadi kehilangan paket (*packet loss*) selama simulasi berlangsung. Skorin-Kapov dan Matijasevic [15] mengklasifikasikan layanan telemedis ke dalam beberapa kelas QoS. Pemantauan tanda vital masuk dalam kategori *Interactive Data* yang mentoleransi sedikit *delay* namun sangat sensitif terhadap *packet loss*. Keberhasilan sistem mencapai *zero packet loss* dalam simulasi ini mengindikasikan bahwa arsitektur perangkat lunak yang dirancang sudah tangguh. Namun, perlu dicatat sebagai batasan penelitian bahwa kondisi jaringan pada simulator Wokwi adalah ideal. Pada implementasi dunia nyata, interferensi sinyal WiFi dan jarak jangkauan router akan mempengaruhi parameter ini, sehingga mekanisme penanganan kesalahan dan pengiriman ulang tetap perlu disiapkan dalam kode program.

3.4 Evaluasi Sistem Peringatan Dini

Salah satu kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi fitur peringatan dini langsung pada perangkat (*on-device alerting*). Kebanyakan sistem IoT konvensional mengirimkan data mentah ke *cloud*, dan analisis peringatan dilakukan di server. Pendekatan tersebut memiliki kelemahan: jika koneksi internet terputus, pasien tidak mendapatkan peringatan. Dalam rancangan ini, keputusan untuk membunyikan alarm atau menampilkan tanda bahaya visual dilakukan oleh ESP32 secara lokal.

Logika Program: IF ($SpO_2 < 95$) THEN (Status = BAHAYA)

Pengujian membuktikan bahwa fitur ini berfungsi secara independen dari status koneksi internet. Bahkan ketika koneksi WiFi pada simulator dimatikan secara paksa, layar OLED tetap menampilkan peringatan “BAHAYA” saat potensiometer SpO_2 diturunkan. Temuan ini sangat signifikan karena meningkatkan aspek keselamatan pasien (*patient safety*). Menurut Rusnawati dan Hariyati [1], keandalan alat kesehatan tidak boleh bergantung sepenuhnya pada pihak ketiga seperti penyedia layanan internet. Dengan adanya pemrosesan lokal (*Edge Processing*), sistem ini memberikan lapisan keamanan ganda bagi pasien.

Nilai ambang batas 95% yang digunakan dalam algoritma ini bukan angka sembarangan, melainkan merujuk pada konsensus medis global. Sebagaimana dijelaskan dalam berbagai literatur medis terkait hipoksia, saturasi oksigen normal berada pada rentang 95–100%. Nilai di bawah 95% memerlukan observasi, dan di bawah 90% memerlukan intervensi oksigen segera [3], [5]. Kesesuaian logika program dengan standar medis ini menegaskan bahwa sistem yang dirancang tidak hanya canggih secara teknis, tetapi juga valid secara klinis.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem telemonitoring kesehatan berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 pada lingkungan simulasi Wokwi, dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem berhasil beroperasi sesuai dengan spesifikasi yang dirancang. Pertama, penggunaan metode *virtual prototyping* terbukti efektif dalam memvalidasi fungsionalitas sistem secara menyeluruh. Mikrokontroler ESP32 mampu menjalankan algoritma akuisisi data dan komunikasi nirkabel secara stabil tanpa mengalami konflik resource. Kedua, dari aspek akurasi, sistem menunjukkan kinerja yang presisi dengan tingkat error pembacaan sensor sebesar 0% dalam lingkungan simulasi. Algoritma konversi data yang diterapkan berhasil menerjemahkan sinyal input analog menjadi parameter medis BPM dan SpO_2 yang valid secara linier. Ketiga, evaluasi kinerja jaringan menunjukkan bahwa sistem memiliki responsivitas tinggi dengan rata-rata latensi pengiriman data sebesar 112 ms dan tingkat keberhasilan pengiriman *delivery ratio* mencapai 100%. Capaian ini memenuhi standar *Quality of Service* (QoS) untuk aplikasi kesehatan *real-time* yang mensyaratkan latensi di bawah 300 ms. Terakhir, fitur sistem peringatan dini (*Early Warning System*) yang terintegrasi pada perangkat (*on-device alerting*) berfungsi secara optimal. Sistem mampu mendeteksi kondisi kritis ($SpO_2 < 95\%$) dan memberikan notifikasi visual secara instan, yang krusial untuk keselamatan pasien rawat jalan. Dengan demikian, rancangan sistem ini layak dijadikan model referensi untuk pengembangan perangkat telemonitoring fisik yang berbiaya rendah dan efisien.

REFERENCES

- [1] R. Dwi Rusnawati and R. Tutik Sri Hariyati, “Implementasi Internet of Things Pada Layanan Kesehatan (Literature Review),” *J. Innov. Res. Knowl.*, vol. 1, no. 8, pp. 569–574, 2022, [Online]. Available: <https://www.bajangjournal.com/index.php/JIRK/article/view/1082>
- [2] L. Kamajaya, A. Pracoyo, L. N. Palupi, and A. R. Hidayat, “Sistem Telemonitoring Kesehatan Berbasis Iot,” *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 137–145, 2023, doi:

- 10.33795/elkolind.v10i2.3062.
- [3] M. A. Adrian, M. R. Widiarto, and R. S. Kusumadiarti, "Health Monitoring System dengan Indikator Suhu Tubuh, Detak Jantung dan Saturasi Oksigen Berbasis Internet of Things (IoT)," *J. Petik*, vol. 7, no. 2, pp. 108–118, 2021, doi: 10.31980/jpetik.v7i2.1230.
 - [4] D. Prima Mulya, Muhammad, Faradika, and H. Afriyeni, "Perancangan Sistem Pemantauan Kesehatan Pasien ICU Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan BLE," vol. 2, pp. 0–5, 2025.
 - [5] T. Hariyanto, U. L. Fajriah, and M. Rahayu, "Perancangan dan Realisasi Sistem Telemonitoring Aktivitas Bioelektrik Jantung dan Kadar Saturasi Oksigen dalam Darah pada Pasien Berbasis IOT," *J. Pendidik. Teknol. dan Kejuru.*, vol. 17, no. 2, pp. 243–253, 2020, [Online]. Available: <https://ejournal.undiksha.ac.id/index.php/JPTK/article/view/25852>
 - [6] R. Arifin, "Telemonitoring Detak Jantung Pasien Berbasis Internet Untuk Implementasi Pada Sistem Telemedika," in *Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 2016. [Online]. Available: <http://eprints.ums.ac.id/47638/>
 - [7] R. A. N. Idmar'a, L. Kamajaya, and Fitri, "Sistem Telemonitoring Gula Darah Menggunakan Non-Invasive Berbasis IoT," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 44–53, 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i1.3494.
 - [8] Arif F and Indra K, "Studi Kinerja Transmisi Data Menggunakan ESP32 dan Raspberry Pi Pico Berbasis Simulasi Wokwi," *J. Zetroem*, vol. 07, no. 01, pp. 80–87, 2025.
 - [9] E. Kurnia, M. Pandia, B. S. B. Sembiring, and D. Margaretta, "Pemanfaatan Internet of Things Pada Smarthome Dengan Model Simulasi Prototype," *J. Ilmu Komput. dan Sist. Inf.*, vol. 7, no. 1, pp. 112–115, 2024, doi: 10.55338/jikoms.v7i1.2728.
 - [10] O. V. Putra, F. R. Pradana, and M. F. Alfarizqi, "Pengembangan Aplikasi iot manajemen Zakat Transaksi Penjualan Dan Pembelian Buah Salak berbasis Web menggunakan Metode Prototype," in *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*, 2021.
 - [11] C. M. Цирульник, M. C. Цирульник, and B. M. Ткачук, "Прототипування проекту iot у сервісі wok wi," pp. 1–7.
 - [12] S. Suhaeb, A. Risal, and Wahyudi, "Pemanfaatan Wokwi Simulation untuk Pengujian Mikrokontroler Light Emitting Diode (LED) yang Efisien dan Akurat," *Micronic J. Multidiscip. Electr. Electron. Eng.*, vol. 8698, pp. 1–8, 2024, doi: 10.61220/micronic.v2i1.240.
 - [13] H. Tung Yew, M. Fung Ng, S. Zhi Ping, S. Kheau Chung, A. Chekima, and J. A. Dargham, "IoT Based Real-Time Remote Patient Monitoring System," *IEEE Int. Colloq. Signal Process. its Appl. (CSPA 2020)*, 2020, doi: 10.1109/DASA51403.2020.9317213.
 - [14] H. M. Hasan and S. A. Jawad, "IoT Protocols for Health Care Systems: A Comparative Study," *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 7, no. 11, pp. 38–45, 2018, [Online]. Available: www.ijcsmc.com
 - [15] L. Skorin-Kapov and M. Matijasevic, "Analysis of QoS requirements for e-Health services and mapping to evolved packet system QoS classes," *Int. J. Telemed. Appl.*, vol. 2010, 2010, doi: 10.1155/2010/628086.