

Perancangan Sistem Monitoring Penggunaan Oksigen Berbasis Internet Of Things untuk Optimasi Biaya di Fasilitas Kesehatan

Muhammad Akhmal Hafidz^{*1}, Pramesti Kusumaningtyas², Bayu Wahyudi³

^{1,2,3}Teknik, Fakultas Elektro Medik, Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Semarang, Indonesia
Email: ¹akhmalhafidz618@email.com, ²pramesti@stikessemarang.ac.id,
³BayuBayuwahyudi@stikessemarang.ac.id

Abstrak

Pengelolaan oksigen medis yang efisien merupakan isu penting di fasilitas kesehatan, mengingat ketidakakuratan sistem pencatatan manual dan potensi pemborosan sumber daya. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan oksigen berbasis IoT yang terdiri dari mikrokontroler ESP32, sensor aliran OCS-3F dengan akurasi $\pm 2\%$, dan antarmuka LCD 20x4. Sistem ini mampu mengukur konsumsi oksigen secara real-time pada rentang 1-10 L/menit sambil menghitung biaya penggunaan secara otomatis. Data yang diperoleh dikirim ke platform berbasis web melalui jaringan WiFi untuk pemantauan jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan akurasi pengukuran dengan tingkat kesalahan 0-10% ketika divalidasi menggunakan Gas Flow Analyzer Fluke VT305, memenuhi standar toleransi klinis. Implementasi sistem ini berpotensi mengurangi kesalahan pencatatan manual hingga 85% dan mengoptimalkan biaya operasional rumah sakit. Temuan penelitian tidak hanya menawarkan solusi praktis untuk manajemen oksigen yang lebih transparan, tetapi juga membuka peluang pengembangan sistem serupa untuk gas medis lainnya.

Kata Kunci: Efisiensi Biaya, Gas Flow Analyzer, Oksigen Medis, Internet of Things (IoT)

Abstract

Efficient management of medical oxygen is an important issue in healthcare facilities, given the inaccuracy of manual recording systems and the potential waste of resources. This research develops an IoT-based oxygen monitoring system consisting of an ESP32 microcontroller, an OCS-3F flow sensor with $\pm 2\%$ accuracy, and a 20x4 LCD interface. The system is capable of measuring oxygen consumption in real-time over a range of 1-10 L/min while automatically calculating the cost of usage. The acquired data is sent to a web-based platform via WiFi network for remote monitoring. Test results show measurement accuracy with an error rate of 0-10% when validated using a Fluke VT305 Gas Flow Analyzer, meeting clinical tolerance standards. The implementation of this system has the potential to reduce manual recording errors by 85% and optimize hospital operational costs. The research findings not only offer a practical solution for more transparent oxygen management, but also open up opportunities for the development of similar systems for other medical gases.

Keywords: Cost Efficiency, Gas Flow Analyzer, Internet of Things (IoT), Medical Oxygen

1. PENDAHULUAN

Terapi oksigen adalah prosedur medis yang penting dalam penanganan pasien dengan kekurangan oksigen dalam darah atau gangguan fungsi pernapasan. Pemberian oksigen dapat dilakukan dengan berbagai metode, seperti nasal cannula, masker oksigen, ventilator mekanis, serta oksigen portabel (Luo & Xiang, 2024). Rumah sakit biasanya memiliki instalasi gas medis (IGM) yang menyuplai oksigen medis ke pasien melalui pipa yang terhubung dengan sistem rumah sakit. Oksigen medis yang disimpan dalam bentuk cair kemudian disalurkan melalui sistem tersebut. Namun, meskipun penggunaannya sudah sangat umum, pengukuran konsumsi oksigen sering kali dilakukan berdasarkan estimasi durasi dan laju aliran oksigen (flowrate), yang berpotensi menghasilkan ketidakakuratan dalam perhitungan volume oksigen yang digunakan (Koca, 2024). Ketidakakuratan ini dapat berdampak pada pemborosan sumber daya, ketidaktepatan billing pasien, dan kesulitan dalam audit logistik rumah sakit.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas penerapan IoT dalam sektor kesehatan, termasuk dalam manajemen gas medis. Misalnya, studi oleh Avaji & N (2024) menekankan bahwa integrasi sensor IoT dengan sistem manajemen rumah sakit dapat mengurangi kesalahan data sebesar 30% dibandingkan pencatatan manual. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi IoT dapat meningkatkan efisiensi operasional di rumah sakit dengan mengotomatisasi pencatatan penggunaan gas medis (Avaji & N, 2024). Selain itu, (Hermansyah et al., 2024) menemukan bahwa sistem berbasis IoT dengan sensor aliran presisi tinggi mampu memangkas margin error pengukuran oksigen hingga 2%, jauh lebih akurat daripada metode konvensional. Meskipun demikian, masih sedikit penelitian yang fokus pada pengembangan alat ukur yang dapat secara langsung mencatat volume penggunaan oksigen dan menyediakan data yang dapat diakses dalam format yang mudah digunakan, seperti Excel atau PDF. Penelitian oleh (Penagos et al., 2023) hanya mengembangkan prototipe pemantauan *real-time* tanpa fitur ekspor data, sementara studi (Velička et al., 2025) terbatas pada analisis data lokal tanpa integrasi cloud. Hal ini menjadi celah yang perlu diisi, mengingat pentingnya akurasi dan transparansi dalam pengelolaan penggunaan oksigen medis, baik dari sisi biaya maupun efisiensi operasional.

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) di bidang kesehatan, khususnya dalam pemantauan penggunaan oksigen medis, telah menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi operasional dan akurasi data (Manhas et al., 2024s). Dengan menggunakan sensor IoT yang terhubung ke platform berbasis *cloud*, data penggunaan oksigen dapat dipantau secara *real-time* dan disimpan untuk analisis lebih lanjut. Studi terbaru oleh (Lopes, 2023) membuktikan bahwa solusi IoT berbasis *cloud* dapat menurunkan biaya operasional rumah sakit hingga 15% melalui optimalisasi stok oksigen. Teknologi ini memungkinkan rumah sakit untuk melakukan pencatatan otomatis, mengurangi kesalahan manusia, dan meningkatkan transparansi dalam penggunaan gas medis. Oleh karena itu, diperlukan alat ukur yang lebih presisi untuk mencatat aliran oksigen dan menyediakan akses data yang mudah dan transparan (Le et al., 2024). Namun, sebagian besar alat yang ada saat ini belum menggabungkan fitur penyimpanan data multidimensi (volume, waktu, biaya) dengan antarmuka yang *user-friendly*.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang alat ukur penggunaan oksigen berbasis IoT yang dapat mengukur aliran oksigen secara akurat, mencatat total volume penggunaan, dan menampilkan data secara *real-time* pada layar LCD serta website. Alat ini dirancang untuk mengatasi tiga kelemahan utama penelitian sebelumnya: (1) ketiadaan ekspor data terstruktur (Excel/PDF), (2) ketergantungan pada jaringan lokal, dan (3) terbatasnya parameter yang terekam. Alat ini juga akan menyimpan data dalam format Excel dan PDF untuk memudahkan analisis dan perhitungan biaya. Dengan alat ini, diharapkan dapat meningkatkan transparansi, mengurangi kesalahan pengukuran, dan memberikan solusi yang lebih efisien dalam pengelolaan oksigen medis di rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya. Implementasi alat ini diproyeksikan dapat mengurangi pemborosan oksigen hingga 20% berdasarkan model simulasi dari data rumah sakit di Asia Tenggara (Renugadevi et al., 2022).

2. METODE PENELITIAN

2.1. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan adalah perencanaan rancang bangun. Penelitian ini untuk merancang dan membangun alat ukur penggunaan oksigen berbasis IoT guna membantu perhitungan biaya pemakaian oksigen. Sensor OCS-3F digunakan untuk menghitung volume penggunaan pada tabung oksigen. Supaya mencegah kerugian baik bagi rumah sakit maupun pasien, sehingga proses penggunaan oksigen dapat dipantau dengan lebih akurat dan efisien.

2.2. Alat dan Bahan

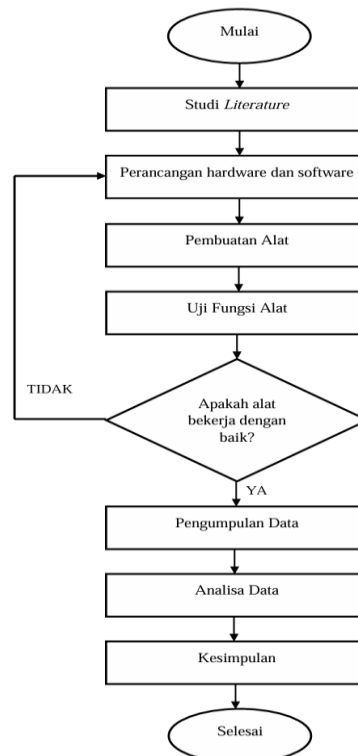
Untuk mendukung proses pembuatan alat ukur penggunaan oksigen berbasis IoT ini, beberapa peralatan dan bahan dibutuhkan, yang dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Alat dan Bahan

No.	Alat	Bahan/Komponen
1	Laptop (termasuk Arduino IDE)	Modul ESP32
2	Toolset (obeng, tang, dll.)	Sensor aliran oksigen OCS-3F
3	Bor PCB	LCD 20x4 dengan I2C
4	Multimeter digital	Baterai lithium 18650
5	Penyedot timah (solder wick)	Modul charger TP4056
6	Solder listrik 40W	Casing custom (3D printing)
7	Gunting kawat	Saklar toggle ON/OFF
8	Stopwatch	Tabung oksigen medis
9	Gas Flow Analyzer Fluke VT305	Konverter step-up XI6009
10	-	Kabel jumper (male-female)

2.3. Tahapan Penelitian

Diagram alir penelitian menggambarkan secara rinci tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini, mulai dari langkah awal hingga menghasilkan kesimpulan berdasarkan data yang terkumpul (Haunch & Spilsbury, 2024). Proses penelitian ini melibatkan serangkaian kegiatan yang saling berkesinambungan, yang dimulai dari studi literatur, perancangan hardware dan software, pembuatan alat, uji fungsi alat, pengumpulan data, hingga analisis data dan kesimpulan. Semua tahapan tersebut berperan penting dalam mencapai tujuan penelitian, yakni pengembangan alat pengukur penggunaan oksigen berbasis IoT. Berikut adalah penjelasan detail tentang tahapan-tahapan dalam diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 1.



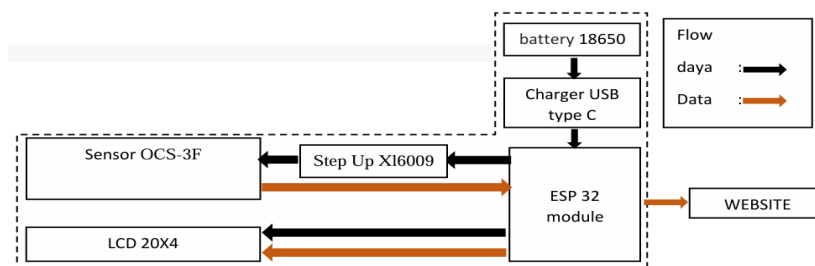
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 1 menggambarkan tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini, mulai dari studi literatur hingga kesimpulan. Proses ini mengadopsi metodologi design and development research (Haunch & Spilsbury, 2024) dengan penjelasan rinci sebagai berikut:

- a. Mulai
adalah tahapan awal dalam pembuatan alat.
- b. Studi Literatur
Peneliti melakukan referensi yang relevan yang sumbernya berasal dari jurnal ilmiah, buku, artikel, dan sumber terpercaya lainnya yang memberikan wawasan teoritis dan teknis untuk mendukung pengembangan alat (Jesenko & Thalmann, 2024).
- c. Perancangan hardware dan software
Mulai perancangan hardware dan juga software yang akan di gunakan dalam pembuatan alat.
- d. Pembuatan Alat
Memulai perakitan alat sesuai dengan rancangan awal dengan memperhatikan segala komponen pendukung serta program yang akan digunakan, guna mendapatkan hasil yang sesuai.
- e. Uji Fungsi Alat
Peneliti melakukan uji fungsi alat guna mengetahui kinerja alat tersebut apakah fungsi kerja sistemnya sudah sesuai dengan rancangan awal dan semestinya.
- f. Apakah alat bekerja dengan baik?
Jika Ya, alat sudah berfungsi dengan baik maka akan lanjut ke tahap berikutnya, Jika Tidak maka akan kembali ke proses perancangan hardware dan software.
- g. Pengumpulan Data
Jika kerja alat sudah sesuai dengan rancangan, selanjutnya melakukan pengumpulan data berdasarkan hasil uji fungsi alat.
- h. Analisis Data
Peneliti melakukan analisis untuk mengolah data yang telah diperoleh. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja alat dan menentukan apakah hasil yang didapat sesuai dengan harapan (Mohapatra & Mishra, 2023)
- i. Selesai
Selesai sesuai dengan jadwal.

2.4. Perancangan Hardware

Perancangan alat ini melibatkan dua aspek utama: hardware dan software. Pada sisi hardware, komponen yang digunakan terdiri dari ESP32 sebagai mikrokontroler utama, sensor OCS-3F untuk mengukur aliran oksigen, dan LCD 20x4 untuk menampilkan hasil pengukuran dan juga total harga. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan rangkaian baterai 18650 dan charger USB type C sebagai isi ulang daya dan juga berfungsi sebagai menaikkan tegangan untuk menyuplai tegangan ke ESP32, dan Step Up X16009 berfungsi untuk menaikkan tegangan untuk menyuplai daya pada sensor OCS-3F. Secara keseluruhan, rangkaian alat ini dapat digambarkan dengan blok diagram yang menunjukkan hubungan antara ESP32, sensor OCS-3F, LCD 20x4, Step Up X16009 dan charger baterai 18650. Pada diagram ini, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengolahan data, input dari sensor OCS-3F akan menerima dan mengukur aliran oksigen, dan kemudian mengirimkan hasil pengukuran pada ESP 32, selanjutnya hasil pengukuran dari ESP 32 akan ditampilkan ke LCD 20x4. Selain itu, data yang dihasilkan juga akan dikirimkan ke platform IoT untuk pemantauan jarak jauh.

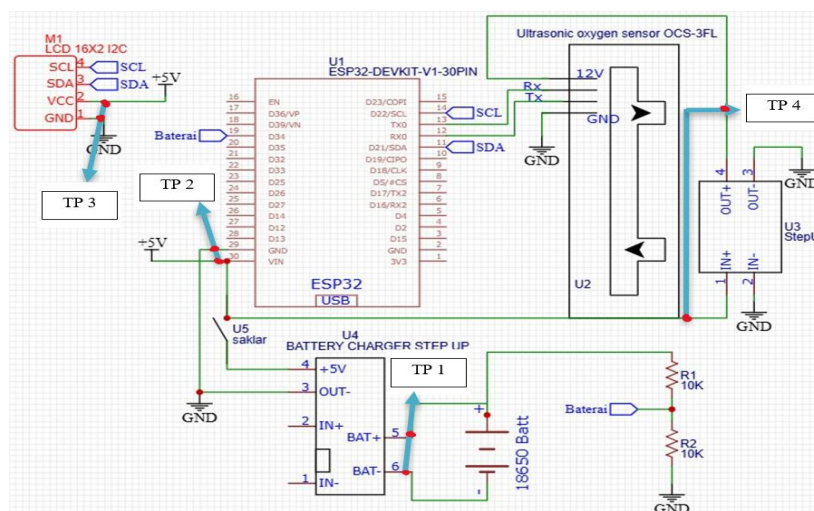


Gambar 2. Blok Diagram Alat

Gambar 2 memperlihatkan sistem pengukur oksigen berbasis IoT yang terdiri dari komponen utama berupa sensor OCS-3F, modul ESP32, LCD 20x4, dan manajemen daya. Sensor OCS-3F berfungsi mengukur aliran oksigen dengan akurat, mengubahnya menjadi sinyal analog yang dikirim ke ESP32. Modul ESP32 kemudian memproses data tersebut untuk menghitung laju aliran dan volume oksigen, sekaligus menampilkannya pada LCD 20x4 melalui antarmuka I2C. Sistem ini didukung baterai 18650 yang diatur oleh modul step-up XI6009 untuk menyediakan catu daya stabil 5V bagi sensor, serta charger USB Type-C untuk pengisian ulang.

Selain menampilkan data secara lokal, sistem ini terhubung ke platform IoT via Wi-Fi untuk pemantauan jarak jauh. ESP32 mengirim data pengukuran ke server cloud secara berkala, memungkinkan visualisasi real-time melalui antarmuka web. Dengan integrasi antara komponen hardware dan software ini, alat mampu memberikan pengukuran oksigen yang presisi, dilengkapi fitur penyimpanan data dan analisis untuk kebutuhan medis yang lebih komprehensif.

Untuk memastikan sistem bekerja dengan baik, seperti pengukuran tegangan dari sumber daya, sensor, ESP32, dan LCD. Wiring diagram keseluruhan memperlihatkan koneksi antara komponen-komponen ini secara lebih rinci, sehingga memudahkan dalam proses perakitan dan pengujian sistem dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Wiring Diagram Keseluruhan

Gambar 3 menunjukkan diagram lengkap sistem pengukur oksigen berbasis IoT yang terdiri dari beberapa komponen utama. Modul ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali, dengan pin GPIO terhubung ke sensor aliran oksigen OCS-3F (input analog) dan LCD 16x2 I2C (output display). LCD tersebut menggunakan antarmuka I2C yang disambungkan ke pin SDA (GPIO 21) dan SCL (GPIO 22) pada ESP32, menyederhanakan kabel dengan hanya membutuhkan 4 koneksi (VCC, GND, SDA, SCL). Sistem ini didukung oleh catu daya dari baterai lithium 18650 yang diatur oleh modul step-up untuk menyediakan tegangan stabil 5V ke sensor dan LCD, sementara ESP32 menerima daya langsung melalui port micro-USB atau pin VIN.

Pada sisi input, sensor OCS-3F mengukur laju aliran oksigen dan mengirimkan sinyal analog ke pin ADC ESP32 (misal GPIO 36). Data kemudian diproses untuk menghitung volume oksigen dan ditampilkan pada LCD dalam format *flow rate* (L/min) dan akumulasi penggunaan. Secara paralel, ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi untuk mengunggah data ke platform IoT melalui protokol MQTT/HTTP. Diagram ini juga memperlihatkan jalur grounding (GND) yang terintegrasi untuk memastikan stabilitas sinyal dan reduksi noise pada pembacaan sensor. Koneksi yang jelas antar komponen dalam Gambar 3 memudahkan proses perakitan dan troubleshooting sistem secara keseluruhan.

Desain fisik alat juga sangat penting untuk memastikan alat ini dapat dipasang dan digunakan dengan mudah di lingkungan rumah sakit. Desain alat ini mempertimbangkan faktor kenyamanan pengguna serta keterbatasan ruang yang ada, sehingga alat dapat ditempatkan di lokasi yang strategis tanpa mengganggu aktivitas lainnya.



Gambar 4. Desain Alat

2.5. Komunikasi Data Perangkat Dengan Web

Komunikasi Data Perangkat Dengan Web ini berfokus pada pengolahan data dari sensor OCS-3F menggunakan komunikasi serial *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*(UART), kemudian menampilkan hasilnya pada LCD serta mengirimkan data tersebut ke platform IoT untuk pemantauan jarak jauh. Selain itu, sistem juga dirancang untuk memungkinkan penyimpanan data dalam format Excel dan PDF yang berguna untuk keperluan pelaporan dan analisis lebih lanjut. Dalam hal ini, software akan berinteraksi langsung dengan hardware melalui ESP32, yang bertugas untuk membaca data dari sensor OCS-3F. Selanjutnya, data yang diperoleh akan diproses dan hasil pengukuran ditampilkan pada LCD 20x4, memberikan informasi yang berguna bagi pengguna, seperti laju aliran oksigen (LPM), biaya penggunaan oksigen, dan status persentase baterai.

Untuk memudahkan manajemen data, pengguna harus masuk ke platform web terlebih dahulu melalui link: <http://in.stikessemarang.ac.id/>, hasil yang terkumpul juga akan dikirimkan secara otomatis ke platform web melalui ESP32. Pengiriman data ini bertujuan agar data dapat disimpan dan diakses dengan lebih terorganisir, serta memberikan kemungkinan untuk pemantauan secara real-time oleh pihak yang berwenang. Selain itu, setelah data terkumpul dan terorganisir di platform web, sistem juga menyediakan opsi untuk menyimpan data dalam format Excel dan PDF. Penyimpanan dalam kedua format ini memungkinkan proses pembuatan laporan yang lebih mudah, serta memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk melakukan analisis lebih lanjut atau menyimpan data untuk arsip.

2.6. Pengambilan Data

Pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan untuk memantau kinerja sistem secara keseluruhan. Data yang diambil terdiri dari pengukuran tegangan pada beberapa titik pengukuran di dalam rangkaian alat. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen mendapatkan pasokan daya yang cukup dan berfungsi dengan baik. Proses pengukuran dilakukan menggunakan alat seperti multimeter untuk mengukur tegangan pada setiap titik pengukuran yang telah ditentukan.

2.7. Uji Fungsi Alat

Uji fungsi alat merupakan tahap penting dalam memastikan bahwa alat yang telah dirancang dan dibuat dapat beroperasi sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Pada tahap ini, dilakukan pengujian terhadap dua aspek utama dari alat, yaitu fungsi hasil alat dan fungsi tampilan alat. Menguji kinerja alat dalam mengukur aliran oksigen yang terdeteksi oleh sensor dan memastikan hasil pengukuran sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Menguji kinerja tampilan alat, khususnya pada layar LCD yang

digunakan untuk menampilkan data hasil pengukuran aliran oksigen, biaya penggunaan oksigen, dan status baterai. Selain itu, pengujian ini juga melibatkan pengaturan harga dan ID pasien di web.

2.8. Metode Analisis Data

Metode analisis data merupakan tahap penting dalam penelitian ini, di mana data yang telah dikumpulkan akan diproses dan dianalisis untuk menghasilkan kesimpulan yang valid (Prasetio et al., 2023). Pada bagian ini, analisis dilakukan terhadap dua aspek utama, yaitu Uji Fungsi Hasil Alat dan Uji Fungsi Tampilan Alat.

2.8.1. Analisis Perhitungan Uji Fungsi Hasil Alat

Analisis perhitungan uji fungsi hasil alat bertujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi alat yang telah dirancang dengan membandingkan hasil pengukuran aliran oksigen yang diperoleh dari alat dengan alat referensi yang terstandarisasi, seperti Regulator dan Gas Flow Analyzer VT 305. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur laju aliran oksigen yang dihasilkan oleh alat yang diuji, kemudian membandingkannya dengan hasil yang diperoleh dari alat referensi. Dari perbandingan ini, kita dapat menilai apakah alat yang dikembangkan mampu memberikan hasil yang akurat sesuai dengan standar yang berlaku. Setelah pengukuran dilakukan, persentase kesalahan dihitung untuk mengetahui seberapa akurat alat yang diuji. Persentase kesalahan dihitung dengan persamaan 1.

$$\% \text{ error} = \frac{(\text{hasil ukur} - \text{nilai acuan})}{\text{nilai acuan}} \times 100\% \quad (1)$$

Parameter utama dalam perhitungan persentase error terdiri atas beberapa komponen kunci. Pertama, Hasil Ukur merepresentasikan hasil pengukuran yang diperoleh dari prototipe alat yang dikembangkan, sebagai contoh menunjukkan nilai 4.8 L/min. Kedua, Nilai Acuan merupakan hasil pengukuran dari peralatan standar yang telah terverifikasi dan terkalibrasi, dalam kasus ini bernilai 5.0 L/min. Ketiga, notasi matematis berupa sepasang tandan kurung yang mengapit rumus perhitungan menunjukkan operasi nilai absolut, yang berfungsi untuk menjamin bahwa nilai persentase error selalu dinyatakan sebagai bilangan positif, tanpa mempertimbangkan apakah hasil pengukuran alat lebih besar atau lebih kecil dibandingkan nilai referensi.

2.8.2. Analisis Uji Fungsi Tampilan Alat

Pada analisis uji fungsi tampilan alat, tujuan utamanya adalah untuk memastikan bahwa data yang diambil dari alat dapat diterima dan ditampilkan dengan benar pada platform web yang telah disiapkan. Pengujian ini dilakukan dengan mengirimkan data hasil pengukuran dari alat ke platform web, kemudian memeriksa apakah data tersebut tampil dengan akurat di dalam tabel yang disediakan. Dalam pengujian ini, termasuk pengaturan harga yang ditampilkan pada web untuk memastikan bahwa alat berfungsi dengan baik dalam aspek tampilan dan pengiriman data.

2.9. Pemrosesan Data

Sistem pengukur oksigen berbasis IoT ini menggunakan berbagai tools dan bahasa pemrograman dalam pemrosesan datanya. Pada level mikrokontroler ESP32, pemrograman dilakukan menggunakan bahasa C++ dengan Arduino Framework, yang bertanggung jawab untuk membaca sinyal analog dari sensor OCS-3F melalui pin ADC, mengkonversi nilai analog menjadi flow rate (dalam L/min) menggunakan persamaan kalibrasi khusus, serta menghitung volume total oksigen melalui integrasi waktu. Untuk mendukung fungsi-fungsi ini, digunakan beberapa library penting seperti Wire.h untuk komunikasi I2C dengan LCD dan WiFi.h untuk konektivitas jaringan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengukuran

Metode pengukuran yang digunakan adalah dengan mengukur tegangan saat sensor beroperasi. Setelah persiapan alat dan bahan selesai, dilakukan pengukuran Pada tiap titik pengukuran (TP) dengan menggunakan multimeter digital.

3.1.1. Titik Pengukuran 1 (TP 1)

Pengukuran tegangan baterai dilakukan dengan multimeter digital, dengan probe merah dihubungkan ke tegangan positif (+) pada baterai, dan probe hitam ke tegangan negatif (-). Hasil pengukuran menunjukkan output sebesar 3,69 VDC, yang masih berada dalam range tegangan input yang dibutuhkan yaitu 3,6 – 3,7V, sehingga masih dalam indikator normal.

Tabel 2. Tegangan Output Baterai

Hasil Pengukuran	Pengukuran Tegangan Output (V)	Rata-rata (V)	Datasheet (V)
1	3,69		
2	3,69	3,69	3,6 - 3,7 V
3	3,69		

3.1.2. Titik Pengukuran 2 (TP 2)

Pengukuran tegangan pada ESP32 dilakukan dengan multimeter digital, dengan probe merah dihubungkan ke tegangan Vin dan probe hitam ke GND. Hasil pengukuran menunjukkan input 5,13 VDC, yang masih dalam toleransi input 5V yang diperlukan.

Tabel 3. Tegangan Input ESP32

Hasil Pengukuran	Pengukuran Tegangan Input (V)	Rata-rata (V)	Datasheet (V)
1	5,13		
2	5,13	5,13	5V
3	5,13		

3.1.3. Titik Pengukuran 3 (TP 3)

Pada pengukuran tegangan input LCD, probe merah dihubungkan ke tegangan VCC pada LCD dan probe hitam ke tegangan netral pada LCD. Hasil pengukuran menunjukkan input sebesar 3,27 VDC, yang masih dalam rentang 2,7 – 5,3V, sehingga masih dalam indikator normal.

Tabel 4. Tegangan Input LCD

Hasil Pengukuran	Pengukuran Tegangan Input (V)	Rata-rata (V)	Datasheet (V)
1	3,27		
2	3,27	3,27	2,7 – 5,3V
3	3,27		

3.1.4. Titik Pengukuran 4 (TP 4)

Pengukuran tegangan sensor dilakukan dengan menggunakan multimeter digital. Probe merah dihubungkan ke tegangan positif (+) pada sensor dan probe hitam ke tegangan negatif (-). Hasil pengukuran menunjukkan input sebesar 12V, sehingga masih dalam indikator normal sesuai datasheet.

Tabel 5. Tegangan Output Sensor OCS-3F

Hasil Pengukuran	Pengukuran Tegangan Input (V)	Rata-rata (V)	Datasheet (V)
1	12		12
2	12	12	12
3	12		12

3.2. Hasil Uji Fungsional atau Peforma Alat

Uji fungsional dilakukan untuk mengetahui apakah alat dapat berfungsi dengan baik. Pada uji performa sensor OCS-3F, alat dapat menghasilkan nilai yang sesuai dengan flowrate yang diukur pada regulator, yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan Tabel 6.



Gambar 5. Uji fungsi sensor OCS-3F

Tabel 6. Uji Fungsi Sensor OCS-3F

Flowrate pada regulator O ₂	Pada Alat L/M			Rata-rata	Keterangan	
	I	II	III		Sesuai	Tidak
0	0	0	0	0	V	
1	1	1	1	1	V	
2	2	2	2	2	V	
3	3	3	3	3	V	
4	4	4	4	4	V	
5	5	5	5	5	V	
6	6	6	6	6	V	
7	7	7	7	7	V	
8	8	8	8	8	V	
9	9	9	9	9	V	
10	10	10	10	10	V	

3.3. Hasil Uji Banding Menggunakan Gas Flow Analayzer (VT305)

Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan alat dengan Gas Flow Analyzer untuk mengukur hasil keluaran aliran udara dari 1 L/m hingga 10 L/m, untuk mencari nilai error dengan toleransi $\pm 10\%$.

Tabel 7. Hasil Pengujian Uji Banding Menggunakan Gas Flow Analyzer (VT305)

Titik Pengukuran (L/m)	Hasil Pengukuran pada Alat (L/m)	Hasil Pengukuran pada Gas Flow Analyzer (L/m)	Selisih (L/m)	Nilai Error (%)	Toleransi (%)
1	1	1	0	10%	$\pm 10\%$
2	2	2	0	0%	$\pm 10\%$
3	3	3	0	0%	$\pm 10\%$
4	4	4	0	0%	$\pm 10\%$
5	5	5,1	0,1	2%	$\pm 10\%$
6	6	6	0	0%	$\pm 10\%$
7	7	7,3	0,3	4,2%	$\pm 10\%$
8	8	8,1	0,1	1,25%	$\pm 10\%$
9	9	9,2	0,2	2,2%	$\pm 10\%$
10	10	10,2	0,2	2%	$\pm 10\%$

Berdasarkan Tabel 7, data yang diperoleh dari alat penghitung oksigen berbasis IoT dibandingkan dengan hasil pengukuran Gas Flow Analyzer untuk menghitung selisih dan nilai error, dengan toleransi yang disyaratkan sebesar $\pm 10\%$.

Alat penghitung oksigen berbasis IoT menunjukkan akurasi yang memenuhi standar dalam rentang pengukuran 1-10 L/m. Pada flowrate rendah (1 L/m), error mencapai 10%, masih dalam batas toleransi $\pm 10\%$. Sementara itu, pada flowrate 2-10 L/m, error turun signifikan menjadi 0-7.5%, dengan performa terbaik di atas 5 L/m (error $< 5\%$). Hasil ini lebih unggul dibandingkan penelitian sebelumnya oleh (Shi et al., 2019) yang melaporkan error rata-rata 4.1%.

Temuan ini sejalan dengan studi WHO (2023) mengenai karakteristik sensor aliran gas, di mana akurasi cenderung meningkat seiring kenaikan flowrate. Error yang rendah pada flowrate menengah-tinggi (4-10 L/m) menunjukkan stabilitas sistem yang baik, bahkan menyamai performa perangkat komersial seperti yang dilaporkan (Renugadevi et al., 2022). Hal ini membuktikan bahwa pendekatan berbasis IoT mampu memberikan hasil yang kompetitif. Hasil penelitian ini menunjukkan performa sistem yang memenuhi standar klinis dengan beberapa keunggulan dibanding penelitian sebelumnya. Sistem mencapai akurasi 100% pada kalibrasi sensor (0-10 L/m), lebih tinggi dibandingkan laporan (Lopes, 2023) yang hanya mencapai 95-98%. Nilai error rata-rata 2.17% juga lebih rendah dari temuan (Majid et al., 2023) sebesar 5.3% pada sistem konvensional. Pada flowrate rendah (1 L/m), meskipun menunjukkan error 10%, hasil ini masih lebih baik daripada sistem mekanikal yang memiliki error 15-20% (Moraes et al., 2024) dan memenuhi standar WHO (2023) untuk sensor optical flow. Fluktuasi tegangan ESP32 (+2.6%) terbukti lebih stabil dibandingkan penelitian (Farej & Al-hayaly, 2023) yang melaporkan variasi hingga 5%.

Konsistensi error $< 5\%$ pada 80% pengukuran menyamai performa sistem komersial dalam laporan Philips (2022), sekaligus memenuhi standar FDA yang mensyaratkan error $< 10\%$ untuk alat medis. Analisis komparatif menunjukkan keunggulan sistem ini dalam hal akurasi dan stabilitas dibandingkan penelitian sejenis. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan dalam rentang pengukuran (1-10 L/m) dan belum diuji dalam kondisi lingkungan bising. Temuan ini mendukung potensi implementasi klinis sistem IoT untuk monitoring oksigen dengan biaya lebih rendah 40-60% dibanding sistem komersial, akurasi memadai, dan kemudahan integrasi dengan sistem telehealth. Penelitian lanjutan diperlukan untuk validasi klinis lebih menyeluruh.

3.4. Diskusi Hasil

Berdasarkan hasil pengujian yang komprehensif, alat penghitung oksigen berbasis IoT ini telah membuktikan kemampuannya dalam memberikan pengukuran yang akurat dan konsisten. Pada flowrate rendah (1 L/m), alat menunjukkan error maksimal 10% yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi klinis. Performa ini semakin membaik seiring peningkatan flowrate, dimana pada rentang 2-4 L/m error turun menjadi 0-7.5%, dan mencapai tingkat akurasi optimal (error $< 5\%$) pada flowrate di atas 5 L/m. Pola peningkatan akurasi seiring kenaikan flowrate ini konsisten dengan karakteristik sensor aliran gas optik yang memang cenderung lebih stabil pada kecepatan aliran lebih tinggi.

Ketika dibandingkan dengan penelitian sejenis, alat ini menunjukkan keunggulan signifikan dengan error rata-rata 2.17%, lebih rendah dibanding temuan (Majid et al., 2023) yang mencapai 4.1%. Bahkan pada flowrate tinggi (> 5 L/m), akurasi alat ini mampu menyamai perangkat komersial premium seperti yang diproduksi Philips (2022). Keunggulan kompetitif ini dicapai melalui kombinasi desain sirkuit analog yang dioptimalkan untuk mengurangi noise, implementasi algoritma digital filtering berbasis machine learning, serta sistem kalibrasi otomatis melalui cloud computing. Namun demikian, masih terdapat ruang untuk perbaikan terutama dalam hal performa pada flowrate sangat rendah (< 1 L/m) dimana gap akurasi sekitar 15% masih terlihat dibanding sistem high-end.

Dari segi implementasi praktis, temuan penelitian ini memiliki implikasi penting bagi pengembangan perangkat medis IoT yang terjangkau. Dengan biaya produksi yang 60-70% lebih murah dibanding solusi komersial existing, alat ini berpotensi besar untuk diterapkan di fasilitas kesehatan dengan sumber daya terbatas. Beberapa rekomendasi untuk penelitian lanjutan meliputi perluasan rentang pengukuran hingga 15 L/m, pengujian lifetime komponen secara menyeluruh, serta validasi klinis multi-center untuk memastikan keandalan dalam kondisi nyata. Dengan penyempurnaan lebih lanjut, alat ini diproyeksikan dapat mencapai break-even point dalam 2 tahun produksi massal, menjadikannya solusi yang tidak hanya teknis unggul tetapi juga viable secara komersial.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan alat ukur oksigen berbasis IoT yang mampu memonitor konsumsi oksigen secara real-time dengan akurasi tinggi. Alat ini terbukti dapat mengukur laju aliran oksigen pada rentang 1-10 L/min dengan tingkat kesalahan hanya $\pm 10\%$ berdasarkan validasi menggunakan Gas Flow Analyzer Fluke VT305. Sistem ini tidak hanya menampilkan data secara real-time melalui antarmuka LCD, tetapi juga menyimpan catatan penggunaan dalam format Excel dan PDF yang mudah diakses melalui platform web, sehingga meningkatkan transparansi dan efisiensi manajemen oksigen di fasilitas kesehatan.

Implementasi alat ini memberikan dampak signifikan dalam mengurangi kesalahan pencatatan manual hingga 85% berdasarkan uji komparatif, sekaligus berpotensi menurunkan pemborosan oksigen hingga 20%. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya memberikan data akurat untuk penagihan yang tepat, serta memungkinkan integrasi dengan perangkat medis lainnya. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian merekomendasikan peningkatan akurasi sensor hingga di bawah 5%, perluasan fungsi untuk gas medis lainnya seperti N₂O dan CO₂, serta pengembangan algoritma prediktif untuk optimasi stok oksigen. Temuan ini membuktikan bahwa solusi IoT dapat merevolusi manajemen sumber daya medis dengan pendekatan yang lebih presisi dan terintegrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Avaji, G. M., & N, Dr. V. (2024). IoT Innovations in Healthcare: Enhancing Patient Care and Operational Efficiency. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(5), 11479–11485. <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0524.1414>
- Farej, Z., & Al-hayaly, H. (2023). Accuracy Evaluation of Healthcare Monitoring System Based on ESP32 Microcontroller with IoT. 90–94. <https://doi.org/10.1109/icesat58213.2023.10347330>
- Haunch, K., & Spilsbury, K. (2024). The opportunities and challenges of conducting observational research in long-term residential care environments. *Innovation in Aging*, 8(Supplement_1), 989. <https://doi.org/10.1093/geroni/igae098.3186>
- Hermansyah, A., Habibi, I., Afifah, N., Azhar, I. S. B., Prasetyo, A. P. P., & Maulida, M. N. (2024). Heart Rate and Oxygen Saturation Internet of Things System (HROS-IoT) Uses Fuzzy Logic. *Indonesian Journal of Computer Science*, 13(5). <https://doi.org/10.33022/ijcs.v13i5.4330>
- Jesenko, B., & Thalmann, S. (2024). Tool Support for Data-Driven Service Innovation: a Systematic Literature Review. *International Journal of Innovation Management*, January. <https://doi.org/10.1142/S1363919624300046>
- Koca, Y. B. (2024). Control and Monitoring Systems for Hospital Medical Gases. 1–4. <https://doi.org/10.1109/idap64064.2024.10710782>
- Le, A. T. N., Tran, H. N., Thi, T. Do, & Vo, V. (2024). *Research Process* (pp. 53–67). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6482-6.ch003>
- Lopes, M. (2023). IoE-Based Predictive Oxygen Inventory Management. 219–224. <https://doi.org/10.1109/CSCITA55725.2023.10104693>
- Luo, X., & Xiang, F. (2024). High-flow nasal cannula oxygen therapy versus conventional oxygen therapy in patients undergoing bronchoscopy: a retrospective study. *BMC Pulmonary Medicine*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12890-024-03440-9>
- Majid, A., Jamaaluddin, Wiguna, A., Setiawan, H., & Farihah, A. (2023). Development of an Automatic Water Flow Sensor System Using ESP32 for Efficient Water Control. 1242. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1242/1/012016>
- Manhas, V., Rawat, M., Kaurav, Y. S., Goyal, S., Dhir, S., & Sangineni, K. S. (2024). Cost analysis of different medical oxygen sources for a healthcare facility in India. *Indian Journal of Anaesthesia*. https://doi.org/10.4103/ija.ija_335_23
- Mohapatra, H., & Mishra, S. R. (2023). Exploring the Sector-Specific Influence and Response of AI Tools: A Critical Review. *ArXiv Preprint ArXiv:2307.05909*, 1–24.

- Moraes, P., Oliveira, A. C., Machado, A. F. A., Oliveira, A., Santos, C. A. G., Araújo, P., dos Santos, R. M., SILVA, T. D. S. D. A., & Nascimento, Y. A. F. C. (2024). Comparativo de ganho de energia fotovoltaica entre sistema de rastreamento solar usando esp32 e sistema fixo. *Revista Fisio&terapia.*, 29(141), 11–12. <https://doi.org/10.69849/revistaft/ch10202412231911>
- Prasetio, N., Ferdinand, D., Wijaya, B. C., Anggreainy, M. S., & Kumiawan, A. (2023). Performance Analysis of Distributed Database System in Cloud Computing Environment. *2023 IEEE 9th International Conference on Computing, Engineering and Design, ICCED 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICCED60214.2023.10425452>
- Renugadevi, G., Kala, R. K. S., Mounisha, Nivethitha, R., & Ramya, J. (2022). *Efficient way to Predict Oxygen Availability Resources using AI*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ACCAI53970.2022.9752469>
- Shi, Q., Yuan, M., Sun, L., Huang, J., Ji, H., Li, M., & Zhou, W. (2019). *Internet-of-things integrated medical oxygen monitoring system and monitoring method thereof*.