

Penerapan AERIS Untuk Pemantauan Kualitas Udara Bagi Masyarakat Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur

Yahya Zarkasi Nur¹, Siti Kommariyah², Fadhilatustsani Sofialana^{*3}, M Alfin Faiz Mentari⁴, Icha Aisyah Dewi⁵, Rohmat⁶

¹ Teknik Komputer, Fakultas Sains, Teknologi dan Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Indonesia

² Fisika, Fakultas Sains, Teknologi dan Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Indonesia

³ Biologi, Fakultas Sains, Teknologi dan Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Indonesia

^{4,5} Administrasi Rumah Sakit, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Indonesia

⁶ Teknik Industri, Fakultas Sains, Teknologi dan Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Indonesia

*e-mail: sfadhilatustsani@gmail.com

Abstrak

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan menerapkan AERIS (Air Environment Real-time Intelligent Sensor) sebagai sistem pemantauan kualitas udara bagi Pemerintah Desa dan masyarakat Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur. AERIS ditempatkan di area semi-outdoor Pendopo Balai Desa Sidokelar untuk memberikan informasi suhu, kelembapan, PM2.5, dan indikator gas secara langsung. Kegiatan melibatkan Pemerintah Desa Sidokelar dalam mendukung penempatan dan pemanfaatan sistem sebagai sarana informasi lingkungan. Data hasil pemantauan ditampilkan melalui LCD dan platform Blynk serta disimpan secara historis pada ThingSpeak. Sebanyak 405 rekaman sensor selama periode 2–12 Agustus 2026 dianalisis secara deskriptif. Hasil menunjukkan rata-rata suhu 30,49 °C, kelembapan 76,06%, PM2.5 sebesar 31,43 µg/m³, dan indeks gas relatif 97,49. Sebanyak 88,40% rekaman berada pada level kualitas udara 1–2, sedangkan 11,60% berada pada level 3–5. Penerapan AERIS memberikan manfaat bagi mitra berupa tersedianya media pemantauan kualitas udara secara langsung, akses pemantauan jarak jauh, dan arsip data historis sebagai bahan informasi serta evaluasi kondisi lingkungan desa. Keterbatasan kontinuitas data dan anomali pembacaan menunjukkan perlunya pengembangan dan kalibrasi sistem lebih lanjut.

Kata kunci: ESP32, Internet of Things, Kualitas udara, Monitoring lingkungan, PM2.5

Abstract

This community service initiative aimed to implement AERIS (Air Environment Real-time Intelligent Sensor) as an air quality monitoring system for the Village Government and residents of Sidokelar Village, Lamongan Regency, East Java. AERIS was installed in the semi-outdoor area of the Sidokelar Village Hall pavilion to provide real-time data on temperature, humidity, PM2.5, and gas indicators. The project involved the Sidokelar Village Government in supporting the system's installation and utilization as a tool for environmental information. Monitoring data was displayed via an LCD screen and the Blynk platform, while also being logged historically on ThingSpeak. A total of 405 sensor readings collected between August 2 and August 12, 2026, were analyzed descriptively. The results showed an average temperature of 30.49°C, humidity of 76.06%, PM2.5 levels of 31.43 µg/m³, and a relative gas index of 97.49. Of the readings, 88.40% fell within air quality levels 1–2, while 11.60% fell within levels 3–5. The implementation of AERIS benefited the partners by providing a real-time air quality monitoring tool, remote monitoring capabilities, and a historical data archive for information and evaluation of the village's environmental conditions. Issues regarding data continuity and reading anomalies indicate a need for further system development and calibration.

Keywords: Air quality, Environmental monitoring, ESP32, Internet of Things, PM2.5

1. PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu aspek lingkungan yang perlu diperhatikan karena kondisi udara dapat berubah seiring dengan aktivitas masyarakat, kendaraan, kegiatan industri, dan kondisi lingkungan. Informasi mengenai kualitas udara yang diperoleh secara berkala dapat membantu masyarakat dan pemerintah desa mengenali perubahan kondisi lingkungan serta menjadi bahan evaluasi dalam pemantauan lingkungan (Gäbel et al., 2022). Polusi udara

merupakan persoalan lingkungan yang membutuhkan pemantauan karena konsentrasi partikulat dan gas dapat berubah seiring waktu, aktivitas manusia, serta kondisi meteorologi (Shabbir et al., 2025). PM2.5 menjadi salah satu parameter penting karena partikelnya berukuran sangat kecil dan berhubungan dengan risiko kesehatan. Ketersediaan data yang lebih rapat secara temporal dapat membantu memahami perubahan kualitas udara pada skala lokal. Pemantauan berbasis sensor berbiaya relatif rendah dan *Internet of Things* (IoT) berkembang sebagai pelengkap sistem pemantauan konvensional (Metia et al., 2021).

Menurut (Rizkia & Santoso, 2025) Menunjukkan bahwa *low-cost sensor* berbasis IoT dapat digunakan untuk pemantauan PM2.5 dan memperoleh hubungan yang kuat terhadap sistem pemantauan acuan setelah proses kalibrasi. Penelitian lain juga menegaskan bahwa sensor partikulat murah perlu dievaluasi dan dikalibrasi karena responsnya dipengaruhi karakteristik aerosol serta kondisi lingkungan (Kang et al., 2022).

ESP32 sesuai digunakan sebagai pengendali sistem pemantauan karena mampu melakukan akuisisi sensor sekaligus komunikasi nirkabel (Sun et al., 2022). Menurut (Pineda-Tobón et al., 2024) Mengembangkan perangkat *AQuality32* berbasis ESP32 untuk pengukuran kualitas udara dan menunjukkan kelayakan pendekatan perangkat terbuka berbiaya relatif rendah untuk pengukuran lingkungan. Sistem IoT untuk pemantauan kualitas udara juga telah digunakan untuk menyediakan visualisasi *real-time* dan penyimpanan historis melalui *platform* daring (Peixe & Marques, 2024). Berdasarkan kebutuhan tersebut, dikembangkan AERIS (*Air Environment Real-time Intelligent Sensor*) untuk ditempatkan di pendopo Balai Desa Sidokelar. Sistem dirancang untuk memberikan informasi suhu, kelembapan, PM2.5, dan indikator gas secara *real-time* serta menyimpan data historis (Goh et al., 2021). Dokumen rancangan sistem menyebutkan bahwa AERIS menggunakan ESP32, DHT22, ZH03B, MQ-135, LCD I2C, Blynk, dan ThingSpeak (Alvear-Puertas et al., 2022).

Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur, merupakan wilayah dengan beragam aktivitas masyarakat dan keberadaan kegiatan industri di sekitar area permukiman. Salah satu aktivitas yang perlu diperhatikan adalah pengolahan batu kapur yang berpotensi menghasilkan debu dan partikulat yang dapat menyebar ke lingkungan sekitar. Selain itu, aktivitas kendaraan yang keluar masuk kawasan industri maupun kendaraan masyarakat sehari-hari dapat turut meningkatkan partikulat di udara (Gabel et al., 2022). Kondisi tersebut menunjukkan perlunya informasi mengenai kualitas udara di lingkungan desa. Namun, berdasarkan kondisi awal yang menjadi dasar pelaksanaan kegiatan, pemantauan kualitas udara di Desa Sidokelar belum dilakukan secara teratur sehingga pemerintah desa dan masyarakat belum memiliki sarana yang dapat memberikan informasi kondisi udara secara langsung dan terdokumentasi (Shabbir et al., 2025).

Akibat banyaknya aktivitas tersebut maka kualitas udara di desa sidokelar perlu diperhatikan. Namun, kualitas udara di desa belum didukung oleh pengukuran yang dilakukan secara teratur, sehingga perubahan tingkat partikulat dan kondisi udara dari waktu ke waktu belum bisa diketahui dengan jelas baik dari masyarakat serta pemerintah desa juga belum memiliki cara yang bisa memberikan informasi langsung mengenai kualitas udara secara *real time*. Karena kondisi tersebut, dibutuhkan sistem pemantauan kualitas udara yang mampu melakukan pengukuran secara berkala, menampilkan kondisi udara secara langsung, dan menyimpan hasil pengukuran tersebut agar perubahan kualitas udara di desa sidokelar dapat diketahui dan dinilai berdasarkan data yang ada.

Kebutuhan tersebut menjadi dasar penerapan AERIS (*Air Environment Real-time Intelligent Sensor*) sebagai sarana pemantauan lingkungan di Desa Sidokelar. AERIS dirancang untuk memberikan informasi mengenai suhu, kelembapan, PM2.5, dan indikator gas secara langsung serta menyimpan data hasil pemantauan sehingga dapat digunakan untuk melihat perubahan kondisi udara dari waktu ke waktu (Alvear-Puertas et al., 2022). Sistem ditempatkan di area semi-outdoor Pendopo Balai Desa Sidokelar agar informasi kondisi lingkungan dapat lebih mudah diakses oleh mitra. Data pemantauan juga dapat dipantau melalui *platform* daring sehingga mendukung akses informasi dari jarak jauh.

Dalam penerapannya, AERIS menggunakan ESP32 sebagai pengendali sistem, sedangkan sensor DHT22, ZH03B, dan MQ-135 digunakan untuk memperoleh parameter suhu, kelembapan,

PM2.5, dan indikator relatif gas (Narayana et al., 2022). Rincian teknis komponen tersebut menjadi bagian pendukung penerapan sistem, sedangkan fokus kegiatan diarahkan pada pemanfaatan AERIS sebagai media pemantauan lingkungan bagi mitra.

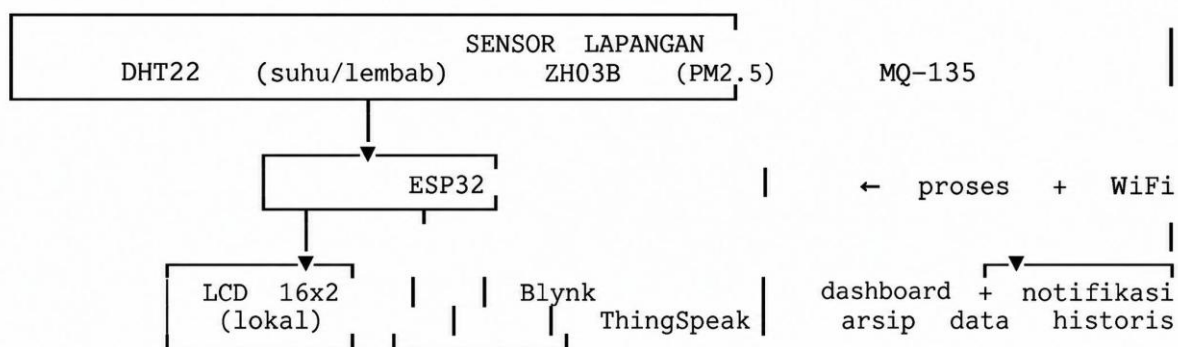
Oleh Karena itu, tujuan penelitian ini adalah menciptakan alat monitoring kualitas udara dengan menganalisis hasil pengukuran AERIS dari data yang tersimpan, menggambarkan distribusi kualitas udara berdasarkan level status yang diterapkan pada sistem, serta mengevaluasi keterbatasan data sebagai dasar pengembangan sistem monitoring lingkungan di desa sidokelar lamongan. Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan menerapkan AERIS sebagai sarana pemantauan kualitas udara di Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur, sehingga Pemerintah Desa dan masyarakat memperoleh akses terhadap informasi kondisi udara secara langsung serta arsip data historis yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan informasi dan evaluasi lingkungan desa.

2. METODE

Metode dalam Pembuatan Aeris menggunakan cara pendekatan rancang bangun dan analisis deskriptif terhadap data sensor. Sistem ditempatkan pada area *semi-outdoor* pendopo Balai Desa Sidokelar. Parameter yang direkam terdiri atas suhu, kelembapan, PM2.5, indeks gas relatif, dan status kualitas udara (Tastan et al., 2025). Komponen dan fungsi sensor mengikuti rancangan AERIS yang mendefinisikan DHT22 untuk suhu atau kelembapan, ZH03B untuk PM2.5, dan MQ-135 untuk indikator relatif gas (Cowell et al., 2024).

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini menggunakan pendekatan penerapan teknologi untuk mendukung pemantauan kualitas udara di Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur. AERIS (Air Environment Real-time Intelligent Sensor) diterapkan sebagai sarana pemantauan lingkungan yang dapat memberikan informasi mengenai kondisi suhu, kelembapan, PM2.5, indikator gas relatif, dan status kualitas udara (Goh et al., 2021). Kegiatan dilaksanakan dengan melibatkan Pemerintah Desa Sidokelar sebagai mitra dalam penerapan dan pemanfaatan sistem, dengan lokasi pemasangan perangkat berada di area semi-outdoor Pendopo Balai Desa Sidokelar.

Pelaksanaan kegiatan terdiri atas beberapa tahapan, yaitu koordinasi dan persiapan bersama mitra, pemasangan dan penerapan perangkat AERIS, pengenalan informasi yang ditampilkan sistem, pemantauan dan pengumpulan data, serta evaluasi keterterapan sistem. Data hasil pemantauan yang tersedia selama periode 2–12 Agustus 2026 digunakan untuk memberikan gambaran kondisi kualitas udara selama penerapan AERIS. Alur kerja sistem mulai dari pembacaan sensor hingga penyajian dan penyimpanan data ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Rancangan Metode Sistem Aeris

Dalam Sistem AERIS terdiri atas ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, sensor ZH03B untuk mengukur konsentrasi PM2.5, serta sensor MQ-135 sebagai indikator relatif keberadaan gas atau polutan di udara. Data hasil pengukuran

diproses oleh ESP32 dan dikirimkan melalui koneksi Wi-Fi. Hasil pengukuran ditampilkan pada LCD I2C 16×2, sedangkan pemantauan jarak jauh dilakukan melalui *platform* Blynk dan penyimpanan data historis dilakukan menggunakan ThingSpeak (Patwardhan et al., 2024).

Kemudian Parameter yang direkam oleh sistem meliputi suhu udara (°C), kelembapan udara (%), PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), indeks gas relatif (%), dan status kualitas udara. Sensor DHT22 digunakan untuk memperoleh data suhu dan kelembapan, ZH03B untuk mengukur PM2.5, sedangkan MQ-135 digunakan sebagai indikator relatif peningkatan gas polutan. Status kualitas udara ditentukan pada skala 1–5 berdasarkan tingkat terburuk dari parameter yang digunakan dalam sistem (Giordano et al., 2021). Setelah itu data pengukuran direkam secara berkala oleh sistem dan disimpan pada *platform* ThingSpeak untuk membentuk arsip data historis. Data tersebut kemudian digunakan untuk analisis kondisi kualitas udara selama periode pengamatan. Grafik historis dapat digunakan untuk melihat perubahan nilai PM2.5 dan parameter lingkungan lainnya sepanjang waktu pengamatan (Lee et al., 2020).

Dan data hasil pengukuran diekspor ke Microsoft Excel untuk dilakukan pengolahan secara deskriptif. Analisis meliputi perhitungan nilai rata-rata, median, nilai minimum, nilai maksimum, serta pengelompokan status kualitas udara berdasarkan rentang konsentrasi PM2.5. Rentang yang digunakan dalam sistem adalah 0–15,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk kategori baik, 15,5–55,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk kategori sedang, 55,5–150,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk kategori tidak sehat, 150,5–250,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk kategori sangat tidak sehat, dan lebih dari 250,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk kategori berbahaya (Samad et al., 2024).

Selain statistik deskriptif, data PM2.5 divisualisasikan dalam bentuk grafik terhadap waktu untuk mengidentifikasi pola perubahan dan nilai ekstrem selama periode pengamatan. Nilai ekstrem juga diperhatikan dalam interpretasi hasil karena dapat memengaruhi nilai rata-rata dan penyebaran data. Evaluasi dan interpretasi data sensor dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik sensor serta kebutuhan kalibrasi.

2.1 Koordinasi dan Persiapan

Tahap koordinasi dilakukan sebagai langkah awal sebelum penerapan AERIS di Desa Sidokelar. Koordinasi dengan Pemerintah Desa Sidokelar dilakukan untuk menentukan lokasi pemasangan perangkat yang sesuai dengan kebutuhan pemantauan lingkungan dan kondisi di sekitar desa. Pendopo Balai Desa dipilih sebagai lokasi penerapan karena merupakan fasilitas desa yang dapat menjadi titik pemantauan sekaligus lokasi yang memungkinkan informasi kondisi lingkungan diakses oleh mitra.

Tahap persiapan selanjutnya meliputi pemeriksaan perangkat dan komponen sistem sebelum digunakan di lokasi. Pemeriksaan dilakukan terhadap ESP32, sensor DHT22, sensor ZH03B, sensor MQ-135, LCD I2C, serta koneksi jaringan yang digunakan untuk pengiriman data (Pineda-Tobon et al., 2024). Selain itu, *platform* Blynk dan ThingSpeak dipersiapkan agar data hasil pengukuran dapat ditampilkan secara daring dan disimpan sebagai data historis. Tahap ini dilakukan untuk memastikan sistem dapat digunakan dalam proses pemantauan setelah perangkat ditempatkan di lokasi kegiatan (Narayana et al., 2022).

2.2 Pemasangan dan Penerapan AERIS

AERIS dipasang pada area semi-outdoor Pendopo Balai Desa Sidokelar untuk melakukan pemantauan kondisi udara di lingkungan sekitar. Sistem menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler yang mengatur proses pembacaan dan pengiriman data. Sensor DHT22 digunakan untuk memperoleh data suhu dan kelembapan, sensor ZH03B digunakan untuk mengukur konsentrasi PM2.5, sedangkan sensor MQ-135 digunakan sebagai indikator relatif terhadap perubahan gas atau polutan di udara. Data dari sensor kemudian diproses oleh ESP32 sebelum dikirimkan melalui koneksi Wi-Fi (Alvear-Puertas et al., 2022).

Hasil pengukuran ditampilkan secara lokal melalui LCD I2C 16×2 sehingga kondisi parameter dapat diketahui melalui perangkat yang berada di lokasi (Keyes et al., 2023). Selain tampilan lokal, AERIS dilengkapi dengan pemantauan jarak jauh melalui dashboard Blynk dan penyimpanan data historis menggunakan ThingSpeak (Alvear-Puertas et al., 2022). Sistem tersebut memungkinkan data hasil pengukuran tidak hanya digunakan sebagai informasi sesaat,

tetapi juga terdokumentasi sehingga dapat digunakan untuk melihat perubahan kondisi kualitas udara selama periode penerapan.

2.3 Edukasi dan Pendampingan Penggunaan

Penerapan AERIS dalam kegiatan pengabdian tidak hanya diarahkan pada pemasangan perangkat, tetapi juga pada pengenalan informasi yang dihasilkan sistem kepada mitra (Tastan et al., 2025). Pemerintah Desa diperkenalkan dengan parameter yang ditampilkan oleh AERIS, meliputi suhu, kelembapan, PM2.5, indeks gas relatif, serta status kualitas udara. Pengenalan tersebut diperlukan agar informasi yang dihasilkan perangkat dapat dipahami dan tidak hanya berhenti sebagai data hasil pengukuran (Ali et al., 2024).

Pendampingan juga diarahkan pada pemanfaatan tampilan informasi melalui LCD dan dashboard Blynk serta penyimpanan data pada ThingSpeak. Informasi pada dashboard dapat digunakan untuk melihat kondisi parameter yang sedang dipantau, sedangkan data historis dapat dimanfaatkan untuk mengetahui perubahan kondisi udara dari waktu ke waktu (Schilt et al., 2023). Dengan demikian, AERIS diharapkan dapat digunakan sebagai media informasi lingkungan yang mendukung Pemerintah Desa dalam memperoleh gambaran kondisi kualitas udara di wilayah desa.

2.4 Pengambilan dan Pengolahan Data

Pengambilan data dilakukan selama periode penerapan AERIS, dengan data yang tersedia berasal dari periode 2–12 Agustus 2026. Sistem merekam beberapa parameter lingkungan yang meliputi suhu udara, kelembapan, PM2.5, indeks gas relatif, dan status kualitas udara (Shabbir et al., 2025). Data hasil pengukuran dikirim melalui koneksi Wi-Fi dan disimpan pada platform ThingSpeak sehingga dapat membentuk arsip data historis yang selanjutnya digunakan dalam proses evaluasi kondisi kualitas udara (Kang et al., 2022).

Data yang tersedia kemudian diekspor ke Microsoft Excel untuk dilakukan pengolahan secara deskriptif. Sebanyak 405 rekaman sensor dianalisis berdasarkan nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan median pada masing-masing parameter. Data PM2.5 juga divisualisasikan terhadap waktu untuk melihat pola perubahan dan nilai ekstrem selama periode pengamatan. Status kualitas udara dikelompokkan berdasarkan level yang diterapkan pada sistem, yaitu level 1 (baik), level 2 (sedang), level 3 (tidak sehat), level 4 (sangat tidak sehat), dan level 5 (berbahaya) (Soemphol et al., 2025).

2.5 Evaluasi Penerapan

Evaluasi dilakukan untuk mengetahui keterterapan AERIS sebagai sarana pemantauan kualitas udara bagi mitra. Evaluasi mencakup keberfungsian sistem dalam membaca parameter lingkungan, penyajian informasi melalui LCD dan dashboard Blynk, serta ketersediaan data historis pada ThingSpeak (Shabbir et al., 2025). Selain itu, evaluasi memperhatikan kemudahan mitra dalam memahami informasi yang ditampilkan, terutama informasi mengenai parameter kualitas udara dan status kualitas udara yang dihasilkan sistem.

Hasil evaluasi digunakan untuk mengetahui manfaat dan kendala selama penerapan AERIS di Desa Sidokelar. Kemampuan mitra dalam membaca informasi AERIS menjadi salah satu aspek penting karena keberhasilan penerapan teknologi tidak hanya ditentukan oleh perangkat yang dapat menghasilkan data, tetapi juga oleh kemampuan pengguna dalam memahami dan memanfaatkan informasi tersebut (Kang et al., 2022). Temuan selama evaluasi selanjutnya dapat menjadi dasar untuk meningkatkan sistem, memperbaiki kontinuitas pencatatan, dan mengembangkan pendampingan penggunaan AERIS pada kegiatan berikutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penerapan AERIS di Desa Sidokelar

Penerapan AERIS (Air Environment Real-time Intelligent Sensor) dilaksanakan sebagai bentuk pemanfaatan teknologi pemantauan kualitas udara di lingkungan Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur. Perangkat ditempatkan pada area semi-outdoor Pendopo Balai Desa Sidokelar sehingga informasi kondisi lingkungan dapat diperoleh secara langsung di lokasi. Penempatan pada ruang publik desa memungkinkan sistem berfungsi sebagai media informasi lingkungan yang dapat mendukung pemerintah desa dalam mengenali perubahan kondisi udara di sekitar lokasi pemantauan.

AERIS menghasilkan informasi suhu, kelembapan, PM_{2.5}, dan indeks gas relatif. Informasi tersebut ditampilkan melalui LCD pada perangkat, sedangkan data dapat dipantau secara jarak jauh melalui platform Blynk dan disimpan secara historis pada ThingSpeak (Metia et al., 2021). Dengan demikian, penerapan sistem tidak hanya menghasilkan data pengukuran, tetapi juga menyediakan sarana untuk melihat kondisi udara secara langsung dan menelusuri rekaman sebelumnya. Keberadaan sistem di lingkungan balai desa dapat menjadi alternatif media pemantauan kualitas udara yang lebih mudah diakses dibandingkan pengukuran yang hanya dilakukan secara berkala menggunakan perangkat yang tidak tersedia secara permanen (Keyes et al., 2023).

Dalam pengambilan data kemarin saat kita melakukan kkn ini didapatkan data set terdiri dari 405 rekaman yang tersedia pada periode 2–12 Agustus 2026, tetapi tidak setiap tanggal pada rentang tersebut memiliki data. Hal ini menunjukkan bahwa sistem belum merekam secara kontinu pada seluruh periode pengamatan. Dikarenakan sistem dirancang untuk penyimpanan historis dan pemantauan *real-time*, kontinuitas akuisisi merupakan aspek penting untuk evaluasi berikutnya.

3.2 Karakteristik Data Sensor

Tabel 1 Konversi Nilai Konsentrasi Parameter ISPU

ISPU	24 Jam partikulat (PM ₁₀) µg/m ³	24 Jam partikulat (PM _{2.5}) µg/m ³	24 Jam sulfur dioksida (SO ₂) µg/m ³	24 Jam karbon monoksida (CO) µg/m ³	24 Jam ozon (O ₃) µg/m ³	24 jam nitrogen dioksida (NO ₂) µg/m ³	24 Jam hidrokarbon (HC) µg/m ³
0 - 50	50	15,5	52	4000	120	80	45
51 - 100	150	55,4	180	8000	235	200	100
101 - 200	350	150,4	400	15000	400	1130	215
201 - 300	420	250,4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Keterangan :

- Data pengukuran selama 24 jam secara terus-menerus
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM_{2.5}) disampaikan tiap jam selama 24 jam.
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM₁₀), sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), ozon (O₃), nitrogen dioksida (NO₂) dan hidrokarbon (HC), diambil nilai ISPU parameter tertinggi dan paling sedikit disampaikan setiap jam 09.00 dan jam.

Pemantauan menghasilkan 405 rekaman data yang tersedia selama periode pengamatan 2–12 Agustus 2026. Data yang diperoleh mencakup parameter suhu, kelembapan, PM_{2.5}, indeks gas relatif, dan status kualitas udara. Statistik deskriptif digunakan untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik hasil pemantauan sekaligus melihat rentang dan kecenderungan data yang dihasilkan oleh system (Giordano et al., 2021).

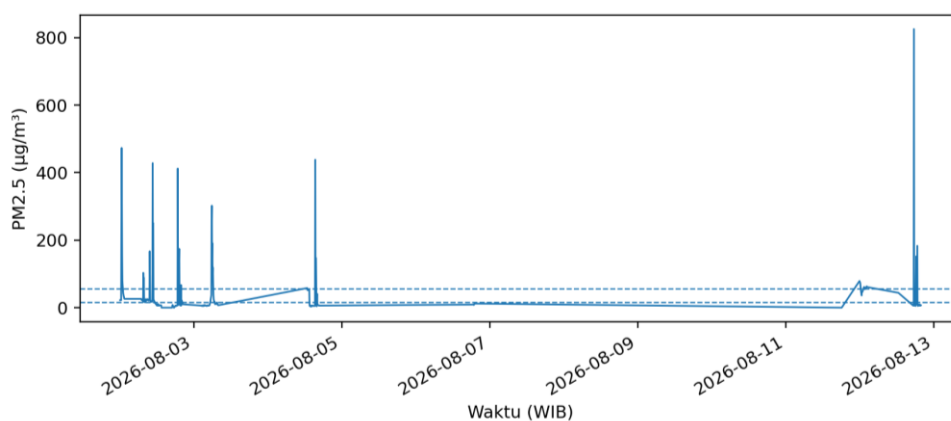
Tabel 2 Statistik deskriptif data sensor AERIS (n = 405)

Parameter	Min	Maks	Rata-rata	Median
Suhu (°C)	0	36.80	30.49	30.40
Kelembapan (%)	0	83.10	76.06	76.70
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0	825	31.43	14.00
Indeks gas relatif	59	119	97.49	99.00
Status	1	5	1.66	1.00

Berdasarkan Tabel 2, rata-rata suhu tercatat sebesar 30,49 °C dengan median 30,40 °C, sedangkan kelembapan rata-rata 76,06%. PM2.5 memiliki rata-rata 31,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tetapi median hanya 14,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Perbedaan ini menunjukkan adanya beberapa nilai tinggi yang menaikkan rata-rata. Nilai maksimum PM2.5 sebesar 825 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ juga jauh lebih tinggi daripada median sehingga pola data bersifat sangat menyebar. Penyebaran data dan keberadaan nilai ekstrem perlu diperhatikan dalam proses evaluasi dan kalibrasi sensor karena *outlier* dapat memengaruhi hasil analisis regresi dan kualitas persamaan kalibrasi (Chen & Chen, 2022). Pada sistem sensor berbiaya rendah, kondisi pembacaan dan kalibrasi perlu diperhatikan karena performa sensor partikulat dapat dipengaruhi kondisi lingkungan dan karakter aerosol (Lee et al., 2020).

Keberadaan nilai ekstrem menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor tidak dapat langsung diperlakukan sebagai gambaran kondisi udara yang sepenuhnya representatif tanpa pemeriksaan kualitas data (Schilt et al., 2023). Pada sensor partikulat berbiaya rendah, kondisi lingkungan, karakteristik aerosol, dan proses kalibrasi dapat memengaruhi hasil pembacaan. Oleh karena itu, data ekstrem perlu menjadi bagian dari proses evaluasi sistem dan bukan langsung ditafsirkan sebagai kejadian polusi yang telah terkonfirmasi.

Grafik rekaman PM2.5 menunjukkan bahwa sebagian besar data berada pada rentang rendah hingga sedang, namun terdapat beberapa lonjakan yang sangat tinggi. Selain itu, ditemukan rangkaian nilai PM2.5 = 0 pada 2 Agustus. Karena suhu dan kelembapan pada sebagian interval tersebut tetap terbaca, nilai nol secara berurutan lebih tepat dicatat sebagai kemungkinan anomali pembacaan atau kondisi sensor daripada langsung dianggap sebagai konsentrasi partikulat nol. Pemeriksaan terhadap aliran data, konektivitas, dan kondisi sensor ZH03B diperlukan untuk memastikan penyebab pola tersebut (Taştan, 2025).



Gambar 2 Rekaman Sensor PM 2.5 Selama Pengamatan

Grafik menunjukkan bahwa sebagian besar rekaman berada pada rentang rendah hingga sedang, tetapi terdapat lonjakan yang sangat tinggi. Selain itu, terdapat rangkaian nilai PM2.5 = 0 pada 2 Agustus yang berlangsung cukup lama. Karena suhu dan kelembapan pada sebagian besar interval tersebut tetap terbaca normal, nilai nol tersebut lebih tepat dicatat sebagai anomali

pembacaan atau kondisi sensor daripada langsung dianggap sebagai konsentrasi partikulat nol. Pemeriksaan terhadap aliran data dan kondisi sensor ZH03B diperlukan.

3.3 Distribusi Status Kualitas Udara

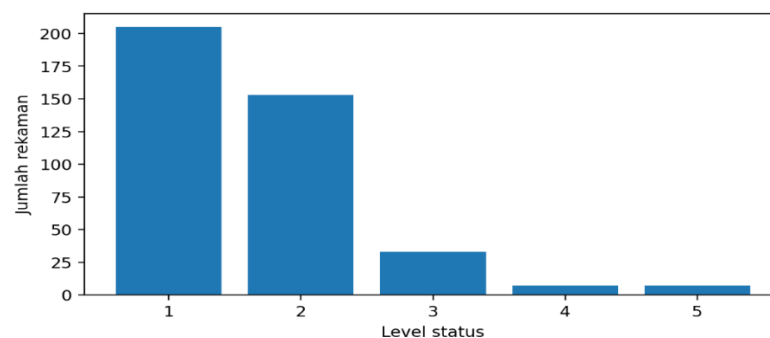
Distribusi status kualitas udara digunakan untuk memberikan gambaran yang lebih mudah dipahami mengenai hasil pemantauan AERIS. Berdasarkan klasifikasi yang digunakan dalam sistem, rekaman dibagi menjadi lima level, yaitu baik, sedang, tidak sehat, sangat tidak sehat, dan berbahaya.

Tabel 3 Distribusi Tingkat Level Berdasarkan (BMKG Badan Meteorologi, Klimatologi, 2026)

Level	Kategori	Jumlah	Persentase
1	Baik	205	50.62%
2	Sedang	153	37.78%
3	Tidak Sehat	33	8.15%
4	Sangat Tidak Sehat	7	1.73%
5	Berbahaya	7	1.73%

Sebanyak 205 rekaman (50,62%) berada pada level 1 dan 153 rekaman (37,78%) berada pada level 2. Dengan demikian, 88,40% rekaman berada pada level 1–2, sedangkan 47 rekaman (11,60%) berada pada level 3–5. Data tersebut menunjukkan bahwa AERIS dapat mengelompokkan hasil pembacaan ke dalam status yang lebih sederhana sehingga informasi sensor dapat digunakan sebagai media pemantauan lokal.

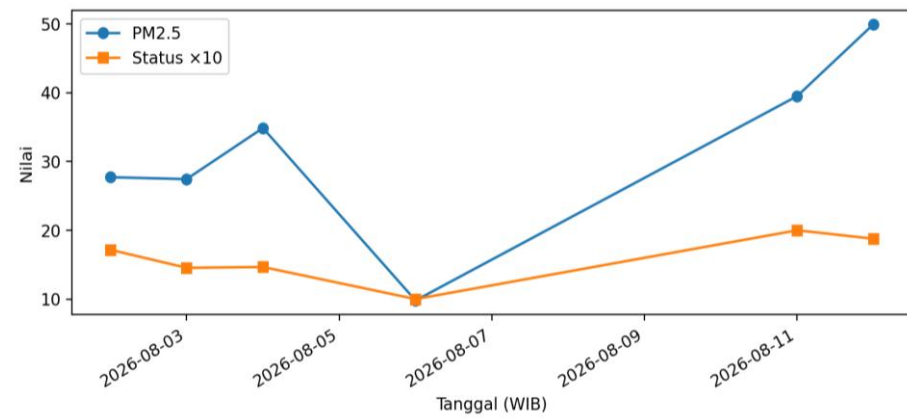
Bagi pemerintah desa dan masyarakat, informasi berbasis level dapat membantu memberikan gambaran awal mengenai perubahan kondisi udara tanpa harus membaca seluruh nilai numerik sensor. Namun, status tersebut harus diposisikan sebagai informasi pemantauan lokal dan bukan sebagai hasil pengukuran regulatori. Rekaman dengan level tinggi perlu ditinjau bersama kondisi sensor dan, apabila diperlukan, dibandingkan dengan instrumen acuan sebelum digunakan untuk menyimpulkan adanya kejadian pencemaran.



Gambar 3 Diagram Distrinusi Kualitas Udara

3.4 Perubahan Harian

Perubahan harian menunjukkan adanya perbedaan nilai rata-rata PM2.5 pada hari-hari dengan data yang tersedia rata-rata PM2.5 harian yang tercatat adalah 27,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 2 Agustus, 27,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 3 Agustus, 34,87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 4 Agustus, 9,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 6 Agustus, 39,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 11 Agustus, dan 49,95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 12 Agustus. Nilai tertinggi di antara hari dengan data yang tersedia terjadi pada 12 Agustus. Perbedaan antarhari menunjukkan bahwa periode pemantauan yang lebih panjang diperlukan untuk membedakan variasi harian biasa dari kejadian polusi tertentu (Cowell et al., 2024).

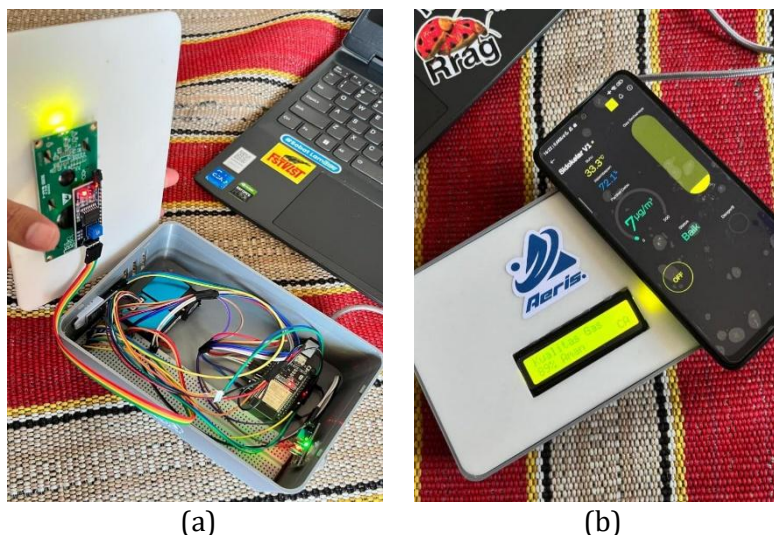


Gambar 4 Rata-rata harian PM2.5 dan status sistem.

Perbedaan antarhari menunjukkan bahwa kondisi kualitas udara dapat berubah selama periode pemantauan. Dalam konteks penerapan di tingkat desa, informasi perubahan tersebut dapat menjadi bahan pemantauan awal bagi pengelola sistem untuk memperhatikan kondisi lingkungan pada waktu tertentu. Meskipun demikian, periode pengamatan yang masih terbatas dan data yang belum tersedia pada seluruh tanggal menyebabkan hasil ini belum cukup untuk menjelaskan pola harian atau musiman secara menyeluruh. Pemantauan yang lebih panjang diperlukan agar perubahan yang teramati dapat dibandingkan dengan kondisi meteorologi, aktivitas lalu lintas, maupun aktivitas lingkungan lainnya (Cowell et al., 2024).

3.5 Implementasi IoT dan Manfaat Sistem

AERIS memiliki tiga jalur keluaran, yaitu tampilan lokal pada LCD, *dashboard* jarak jauh melalui Blynk, dan arsip historis pada ThingSpeak (De Vito et al., 2021). Sistem juga dirancang memberikan notifikasi ketika kondisi kualitas udara memburuk. Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian IoT *air-quality monitoring* yang memanfaatkan ESP32 dan konektivitas nirkabel untuk visualisasi *real-time* serta penyimpanan historis (Soemphol et al., 2025). Misalnya, menunjukkan kelayakan sistem IoT berbasis ESP32 dengan sensor kualitas udara untuk penggunaan luar ruang dan akses data melalui Blynk.



Gambar 5 Implementasi Sistem AERIS: (a) Rangkaian komponen internal dan (b) Perangkat AERIS dengan tampilan *monitoring* pada aplikasi Blynk dan LCD

Dari sisi implementasi di Desa Sidokelar, sistem dapat menjadi sarana informasi lingkungan yang mudah dilihat di lokasi dan dapat dipantau dari jarak jauh. Arsip historis juga

memungkinkan pemerintah desa melakukan evaluasi tren. Namun, fungsi MQ-135 pada AERIS harus dipahami sebagai indeks gas relatif, bukan konsentrasi absolut beberapa gas tertentu, karena dokumen sistem sendiri menetapkan parameter tersebut sebagai indikator relatif terhadap *baseline*

3.6 Pemanfaatan AERIS bagi Mitra

Penerapan AERIS memberikan beberapa keluaran yang dapat dimanfaatkan pada lingkungan Desa Sidokelar. LCD menyediakan informasi secara langsung pada lokasi perangkat, Blynk memungkinkan pemantauan dari jarak jauh, sedangkan ThingSpeak menyediakan arsip historis yang dapat digunakan untuk melihat rekaman dan kecenderungan data. Kombinasi ketiga keluaran tersebut membuat informasi tidak hanya tersedia pada saat pengukuran berlangsung, tetapi juga dapat ditinjau kembali setelah data tersimpan.

Pemanfaatan tersebut memberikan alternatif media informasi lingkungan bagi pemerintah desa dalam mengenali kondisi udara di sekitar lokasi pemasangan. Data historis dapat menjadi bahan dokumentasi dan evaluasi awal, sedangkan informasi real-time dapat membantu pengguna mengetahui kondisi pada saat tertentu. Sistem juga dirancang memiliki fungsi notifikasi ketika kondisi kualitas udara memburuk, tetapi efektivitas fungsi peringatan sebagai sistem peringatan dini masih memerlukan pengujian lebih lanjut terhadap keandalan notifikasi dan respons pengguna.

Parameter indeks gas dari MQ-135 juga perlu dipahami secara tepat. Nilai yang ditampilkan merupakan indikator gas relatif terhadap *baseline* sistem dan bukan konsentrasi absolut dari gas tertentu. Oleh karena itu, informasi tersebut lebih sesuai digunakan untuk melihat perubahan relatif dibandingkan sebagai dasar penentuan konsentrasi gas secara kuantitatif.

3.7 Evaluasi Penerapan dan Keberlanjutan Sistem

Evaluasi penerapan AERIS diarahkan pada keterjangkauan informasi, ketersediaan data historis, serta kemudahan pemantauan melalui LCD dan platform digital. Dari sisi sistem, tersedianya keluaran lokal dan jarak jauh memungkinkan pemantauan dilakukan melalui lebih dari satu jalur. Hal tersebut menjadi dasar untuk pengembangan pemanfaatan AERIS secara berkelanjutan di lingkungan desa.

Keberlanjutan penerapan membutuhkan pengelolaan perangkat pada tingkat desa, termasuk pemeriksaan kondisi sensor, catu daya, konektivitas, dan aliran data secara berkala. Pemantauan dashboard juga perlu dilakukan secara rutin agar gangguan pencatatan dapat segera diketahui. Pendampingan pengguna dapat dilanjutkan dengan menekankan cara membaca parameter, memahami level kualitas udara, meninjau data historis, dan mengenali pembacaan yang tidak wajar. Karena artikel ini tidak memiliki data kuantitatif mengenai tingkat pemahaman atau respons pengguna setelah penerapan, efektivitas pemberdayaan masyarakat belum dapat dinyatakan secara numerik dan perlu dievaluasi pada kegiatan lanjutan (Manshur et al., 2023).

3.8 Keterbatasan Penerapan dan Pengembangan

Penerapan AERIS masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, data belum kontinu pada seluruh tanggal pengamatan dan terdapat rangkaian nilai nol yang berpotensi merupakan anomali pembacaan. Sistem selanjutnya perlu dilengkapi validasi otomatis untuk mendeteksi data tidak valid, kehilangan paket, atau kondisi sensor yang belum siap digunakan.

Kedua, sensor PM2.5 yang digunakan merupakan sensor berbiaya rendah sehingga kalibrasi atau evaluasi terhadap instrumen acuan diperlukan untuk meningkatkan keandalan data. Nilai maksimum $825 \mu\text{g}/\text{m}^3$ juga perlu diperiksa lebih lanjut sebelum ditafsirkan sebagai kondisi pencemaran aktual. Ketiga, interpretasi MQ-135 perlu tetap dibatasi sebagai perubahan relatif. Pengembangan dapat dilakukan melalui penggunaan sensor gas yang lebih selektif atau kalibrasi multi-titik terhadap instrumen referensi (Ali et al., 2024).

Keempat, periode pengamatan perlu diperpanjang menjadi beberapa minggu atau bulan agar pola harian dan musiman dapat dianalisis dengan lebih baik. Integrasi data meteorologi, aktivitas lalu lintas, dan aktivitas industri juga dapat membantu menjelaskan kemungkinan

penyebab perubahan atau lonjakan PM2.5. Dengan pengembangan tersebut, AERIS berpotensi menjadi sistem pemantauan lingkungan yang lebih andal sekaligus lebih bermanfaat sebagai media informasi kualitas udara bagi pemerintah desa dan masyarakat.

4. KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat melalui penerapan AERIS (Air Environment Real-time Intelligent Sensor) di Desa Sidokelar, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur, telah menghasilkan sarana pemantauan kualitas udara yang dapat digunakan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi lingkungan desa. AERIS diterapkan pada area semi-outdoor Pendopo Balai Desa Sidokelar dengan mengintegrasikan sensor suhu, kelembapan, PM2.5, dan indikator gas relatif. Informasi hasil pemantauan dapat ditampilkan secara langsung melalui LCD, dipantau melalui dashboard Blynk, serta disimpan pada ThingSpeak sebagai data historis. Penerapan tersebut memberikan alternatif sarana bagi Pemerintah Desa dan masyarakat untuk memperoleh informasi mengenai kondisi kualitas udara secara lebih mudah dan terdokumentasi.

Selama periode pengamatan 2–12 Agustus 2026, tersedia 405 rekaman hasil pemantauan yang menunjukkan bahwa sistem telah mampu menghasilkan dan menyimpan data lingkungan selama penerapan. Hasil pengolahan menunjukkan rata-rata suhu sebesar 30,49 °C, kelembapan 76,06%, PM2.5 sebesar 31,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dan indeks gas relatif sebesar 97,49. Sebanyak 88,40% rekaman berada pada level status 1–2, sedangkan 11,60% berada pada level 3–5. Data tersebut memberikan gambaran awal mengenai variasi kondisi udara di lokasi penerapan dan menunjukkan bahwa AERIS dapat digunakan sebagai media pemantauan serta penyedia informasi lingkungan tingkat desa.

Dari sisi pengabdian kepada masyarakat, capaian utama kegiatan adalah tersedianya perangkat pemantauan kualitas udara yang ditempatkan pada fasilitas desa serta adanya sistem penyajian dan penyimpanan data yang dapat mendukung pemantauan lingkungan. Keberadaan AERIS dapat membantu memperkenalkan pemanfaatan teknologi sensor dan data lingkungan kepada mitra serta menyediakan arsip informasi yang dapat digunakan sebagai bahan evaluasi kondisi udara. Namun, pemanfaatan sistem sebagai sarana informasi perlu disertai pemahaman pengguna mengenai parameter yang ditampilkan dan keterbatasan pembacaan sensor. Naskah ini belum memiliki data kuantitatif mengenai tingkat pemahaman atau respons pengguna sehingga capaian pemberdayaan pada aspek tersebut belum dapat dinilai secara terukur.

Penerapan AERIS masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain data yang belum tersedia secara kontinu pada seluruh periode pengamatan, adanya rangkaian nilai PM2.5 sebesar nol, serta ditemukannya nilai maksimum PM2.5 hingga 825 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pemeriksaan terhadap sensor, aliran data, kestabilan koneksi, dan proses akuisisi untuk membedakan perubahan kondisi lingkungan dengan kemungkinan anomali pembacaan. Selain itu, sensor PM2.5 dan indikator gas relatif memerlukan evaluasi serta kalibrasi terhadap instrumen acuan sebelum hasilnya digunakan untuk penilaian kualitas udara yang bersifat regulatori. Oleh karena itu, hasil penerapan AERIS pada kegiatan ini lebih tepat dimanfaatkan sebagai informasi dan pemantauan awal kondisi lingkungan.

Keberlanjutan penerapan AERIS di tingkat desa perlu diarahkan pada pengelolaan perangkat, pemantauan dashboard, pemeriksaan kondisi sensor dan koneksi secara berkala, serta pendampingan pengguna. Pemerintah Desa dapat dilibatkan dalam pemanfaatan informasi yang tersedia untuk memantau kondisi lingkungan, sedangkan pengoperasian teknis dan pemeliharaan sistem perlu didukung melalui pendampingan yang berkelanjutan. Evaluasi berikutnya juga perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan perangkat desa atau masyarakat dalam membaca dan memanfaatkan informasi AERIS, sehingga keberhasilan program tidak hanya diukur dari kemampuan perangkat menghasilkan data, tetapi juga dari sejauh mana teknologi tersebut dapat dimanfaatkan oleh mitra secara berkelanjutan.

Dengan demikian, penerapan AERIS di Desa Sidokelar menunjukkan potensi sebagai sarana pemantauan lingkungan berbasis teknologi yang mendukung ketersediaan informasi kualitas udara bagi Pemerintah Desa dan masyarakat. Pengembangan selanjutnya perlu

diarahkan pada peningkatan kontinuitas pencatatan, deteksi anomali secara otomatis, kalibrasi sensor terhadap instrumen acuan, peningkatan keandalan konektivitas, serta penguatan edukasi dan pendampingan pengguna. Langkah tersebut diharapkan dapat meningkatkan keandalan AERIS sekaligus memperkuat kebermanfaatannya sebagai sarana pemantauan kualitas udara yang dapat dikelola dan dimanfaatkan di tingkat desa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Lamongan, Pemerintah Desa Sidokelar, serta seluruh pihak yang mendukung perancangan, pemasangan, pengambilan data, dan evaluasi sistem AERIS.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, S., Alam, F., Potgieter, J., & Arif, K. M. (2024). Leveraging temporal information to improve machine learning-based calibration techniques for low-cost air quality sensors. *Sensors*, 24(9), 2930. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24092930>
- Alvear-Puertas, V. E., Rosero-Montalvo, Y. A. B.-P. P. D., Tözün, P., & Febricio, M. (2022). Smart and Portable Air-Quality Monitoring IoT Low-Cost Devices in Ibarra City, Ecuador. *Sensors*, 22(18), 7015. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22187015>
- BMKG Badan Meteorologi, Klimatologi, dan G. (2026). *Informasi kualitas udara konsentrasi partikulat (PM2.5) di seluruh wilayah Indonesia*.
- Chen, H. Y., & Chen, C. (2022). Evaluation of Calibration Equations by Using Regression Analysis: An Example of Chemical Analysis. *Sensors*, 22(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22020447>
- Cowell, N., Baldo, C., Chapman, L., Bloss, W., & Zhong, J. (2024). What can we learn from nested IoT low-cost sensor networks for air quality? A case study of PM2.5 in Birmingham, UK. *Meteorological Applications*, 31(14), e2220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/met.2220>
- De Vito, S., Esposito, E., Massera, E., Formisano, F., Fattoruso, G., Ferlito, S., Del Giudice, A., D'Elia, G., Salvato, M., Polichetti, T., & Others. (2021). Crowdsensing IoT architecture for pervasive air quality and exposome monitoring: Design, development, calibration, and long-term validation. *Sensors*, 21(15), 5219. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21155219>
- Gäbel, P., Koller, C., & Hertig, E. (2022). Development of air quality boxes based on low-cost sensor technology for ambient air quality monitoring. *Sensors*, 22(10), 3830. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22103830>
- Giordano, M. R., Malings, C., Pandis, S. N., Presto, A. A., McNeill, V. F., Westervelt, D. M., Beekmann, M., & Subramanian, R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal of Aerosol Science*, 153(105833). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105833>
- Goh, C. C., Kamarudin, L. M., Zakaria, A., Nishizaki, H., Ramli, N., Mao, X., Syed Zakaria, S. M. M., Kanagaraj, E., Abdull Sukor, A. S., & Elham, M. F. (2021). Real-time in-vehicle air quality monitoring system using machine learning prediction algorithm. *Sensors*, 21(15), 4956. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21154956>
- Kang, Y., Aye, L., Ngo, T. D., & Zhou, J. (2022). Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review. *Science of the Total Environment*, 818(151769). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151769>
- Keyes, T., Domingo, R., Dynowski, S., Graves, R., & Klein, M. (2023). Low-cost PM2.5 sensors can

- help identify driving factors of poor air quality and benefit communities. *Heliyon*, 9(9), e19876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19876>
- Lee, H., Kang, J., Kim, S., Im, Y., Yoo, S., & Lee, D. (2020). Long-term evaluation and calibration of low-cost particulate matter (PM) sensor. *Sensors (Switzerland)*, 20(13), 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s20133617>
- Manshur, T., Luiu, C., Avis, W. R., Bukachi, V., Gatari, M., Mulligan, J., Ng'an'ga, D., Radcliffe, J., Singh, A., Waiguru, E., Wandera, A., & Pope, F. D. (2023). A citizen science approach for air quality monitoring in a Kenyan informal development. *City and Environment Interactions*, 19(100105). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100105>
- Metia, S., Nguyen, H. A. D., & Ha, Q. P. (2021). IoT-enabled wireless sensor networks for air pollution monitoring with extended fractional-order kalman filtering. *Sensors*, 21(16). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21165313>
- Narayana, M. V., Jaliha, D., & Nagendra, S. M. S. (2022). Establishing a sustainable low-cost air quality monitoring setup: A survey of the state-of-the-art. *Sensors*, 22(1), 394. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22010394>
- Patwardhan, I., Bijjam, S. D., Chaudhari, S., Rajan, K. S., & Vemuri, K. V. (2024). Development of end-to-end low-cost IoT system for densely deployed PM monitoring network: An Indian case study. *Frontiers in the Internet of Things*, 3(1332322). <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/friot.2024.1332322>
- Peixe, J., & Marques, G. (2024). Low-cost IoT-enabled indoor air quality monitoring systems: A systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 16(2), 167–180. <https://doi.org/https://doi.org/10.3233/AIS-220577>
- Pineda-Tobón, D. M., Espinosa-Bedoya, A., & Branch-Bedoya, J. W. (2024). Aquality32: A low-cost, open-source air quality monitoring device leveraging the ESP32 and Google platform. *HardwareX*, 20(e00607). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00607>
- Rizkia, V., & Santoso, J. (2025). *Optimasi Sodium Lauryl Sulfate Sebagai Surfaktan Dalam Sediaan Handwash Dari Ekstrak Ampas Teh Hitam (Black Tea)*. 6, 2307–2316.
- Samad, A., Kieser, J., Chourdakis, I., & Vogt, U. (2024). Developing a cloud-based air quality monitoring platform using low-cost sensors. *Sensors*, 24(3), 954. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24030945>
- Schilt, U., Barahona, B., Buck, R., Meyer, P., Kappani, P., Möckli, Y., Meyer, M., & Schuetz, P. (2023). Low-cost sensor node for air quality monitoring: Field tests and validation of particulate matter measurements. *Sensors*, 23(2), 794. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23020794>
- Shabbir, M., Saeed, T., Saleem, A., Bhave, P., Bergin, M., & Khokhar, M. F. (2025). A paradigm shift: Low-cost sensors for effective air quality monitoring and management in developing countries. *Environment International*, 200(109521). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109521>
- Soemphol, C., Thongsan, T., Ninkaew, S., & Panmuang, P. (2025). Design and implementation of a solar-powered IoT-based real-time air quality monitoring system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 14(5), 4150–4160. <https://doi.org/https://doi.org/10.11591/eei.v14i5.10473>
- Sun, V. (2022). A low-cost computer and sensors for air quality monitoring. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(293). <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s43017-022-00297-6>
- Taştan, M. (2025). Machine learning-based calibration and performance evaluation of low-cost Internet of Things air quality sensors. *Sensors*, 25(10), 3183. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s25103183>

Halaman ini dikosongkan