Rancang dan Evaluasi Kinerja Sistem Pemantau Kualitas Udara Berbasis Internet of Things Menggunakan Sensor SEN0460

Design and Performance Evaluation of an Internet of Things-Based Air Quality Monitoring System Using the SEN0460 Sensor

Christiani Yossi[1], Muhammad Ishak Jumarang[1], Boni Pahlanop Lapanporo[1], Andi Ihwan[2*]

[1,2]Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. Hadari Nawawi, Pontianak, Indonesia 78124

Email: h1071221023@student.untan.ac.id, ishakjumarang@physics.untan.ac.id, boni8poro@physics.untan.ac.id, *andihwan@physic.untan.ac.id

Received: 12th May 2026; Revised: 05th June 2026; Accepted: 26nd July 2026

Abstrak – *Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) untuk mengukur konsentrasi PM2.5 dan PM10 secara real-time menggunakan sensor SEN0460. Sistem dirancang dengan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke jaringan Wi-Fi, platform ThingSpeak untuk pemantauan data daring, serta media penyimpanan lokal berbasis SD card guna menjamin ketersediaan data hasil pengukuran. Metode penelitian meliputi perancangan sistem, pengujian, kalibrasi dengan alat standar Bosean, serta pengambilan data di lingkungan terbuka. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara terintegrasi dalam proses akuisisi, transmisi, visualisasi, dan penyimpanan data. Hasil kalibrasi menunjukkan performa sangat baik pada parameter PM2.5 dengan nilai korelasi hingga 0,99 serta RMSE sebesar 4,79%, sedangkan parameter PM10 menunjukkan korelasi kuat dengan RMSE sebesar 20,01%. Nilai RMSE yang lebih rendah pada parameter PM2.5 diduga disebabkan oleh karakteristik sensor berbasis laser scattering yang lebih sensitif terhadap partikel berukuran kecil dibandingkan dengan partikel berukuran lebih besar. Sistem ini berpotensi sebagai solusi pemantauan kualitas udara yang efisien dan berkelanjutan, terutama untuk wilayah dengan keterbatasan infrastruktur monitoring.*

Kata kunci: *Internet of Things (IoT); pemantauan kualitas udara; PM2.5; PM10; ThingSpeak*

Abstract – *The study aims to develop and evaluate an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system for real-time measurement of PM2.5 and PM10 concentrations using the SEN0460 sensor. The system design includes an ESP32 microcontroller connected to a Wi-Fi network, a ThingSpeak platform for online data monitoring, and an SD card-based local storage device to ensure the availability of measurement data. The research method includes system design, testing, calibration with Bosean standard equipment, and data collection in an open environment. The results show that the system can operate in an integrated manner across data acquisition, transmission, visualization, and storage. The calibration results show excellent performance for PM2.5 parameters, with correlation coefficients up to 0.99 and RMSEs of 4.79%, while the PM10 parameter shows a strong correlation with an RMSE of 20.01%. The greater sensitivity of the laser-scattering-based sensor to small particles may contribute to the lower RMSE observed for the PM2.5 parameter. This system has the potential to be an efficient and sustainable air quality monitoring solution, especially for areas with limited monitoring infrastructure.*

Keywords: *Internet of Things (IoT); air quality monitoring; PM2.5; PM10; ThingSpeak.*

1. Pendahuluan

Kualitas udara menjadi penentu utama bagi kesehatan manusia dan kelangsungan ekosistem [1]. Indonesia, termasuk Kalimantan Barat, menghadapi penurunan kualitas udara yang signifikan akibat berbagai sumber pencemar, seperti kabut asap kebakaran hutan dan lahan, emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, serta emisi yang berasal dari kegiatan domestik [2]. Kondisi ini diperparah oleh pembangunan yang masif dan dampak perubahan iklim, sehingga diperlukan sistem pemantauan kualitas udara yang efektif dan berkelanjutan [3]. Isu tersebut menjadi perhatian serius karena penurunan kualitas udara bukan sekedar kejadian musiman, melainkan juga memperlihatkan kecenderungan meningkat di sejumlah daerah.

Salah satu penyebab penurunan kualitas udara adalah meningkatnya konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 yang digunakan sebagai indikator dalam penilaian tingkat pencemaran udara [4, 5]. Partikel tersebut berisiko mengganggu kesehatan, terutama memicu masalah pernapasan, dan di sejumlah kota besar konsentrasinya bahkan sudah melampaui ambang batas *World Health Organization* (WHO), khususnya ketika musim kemarau tiba [6, 7]. Dampak pencemaran udara tidak berhenti pada sektor kesehatan, namun juga menyentuh aspek lingkungan dan ekonomi [8]. Aktivitas masyarakat terhambat dan produktivitas kerja menurun akibat udara yang tercemar [9]. Hal tersebut menegaskan bahwa pencemaran udara merupakan isu lintas bidang yang menuntut penanganan solusi berbasis data yang tepat dan berkesinambungan.

Keterbatasan sistem pemantauan saat ini menyebabkan informasi kualitas udara *real-time* belum mudah diakses oleh publik [10]. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang mampu menyediakan data kualitas udara secara cepat dan akurat. Salah satu teknologi yang berpotensi memenuhi kebutuhan tersebut adalah *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan pemantauan berbasis sensor secara *real-time* dan mudah diakses [11]. Meskipun berbagai penelitian telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT, sebagian besar masih berfokus pada implementasi perangkat tanpa evaluasi kinerja sensor yang memadai, khususnya dalam pengukuran PM2.5 dan PM10. Selain itu, kajian yang melibatkan validasi sensor menggunakan instrumen standar, integrasi penyimpanan data lokal dan *cloud*, serta pengujian pada kondisi lingkungan tropis di Kalimantan Barat masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kinerja sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor SEN0460. Sistem dikembangkan dengan mengintegrasikan pemantauan *real-time*, penyimpanan data lokal menggunakan *SD card*, serta visualisasi data melalui platform *ThingSpeak*. Evaluasi kinerja dilakukan melalui kalibrasi dan perbandingan hasil pengukuran dengan instrumen standar Bosean untuk menilai akurasi dan keandalan sistem. Kontribusi utama penelitian ini adalah evaluasi performa sensor SEN0460 dalam pengukuran PM2.5 dan PM10 pada kondisi lingkungan nyata di Kalimantan Barat serta pengujian integrasi penyimpanan data lokal dan *cloud* untuk mendukung pemantauan kualitas udara yang berkelanjutan.

2. Material dan Metode

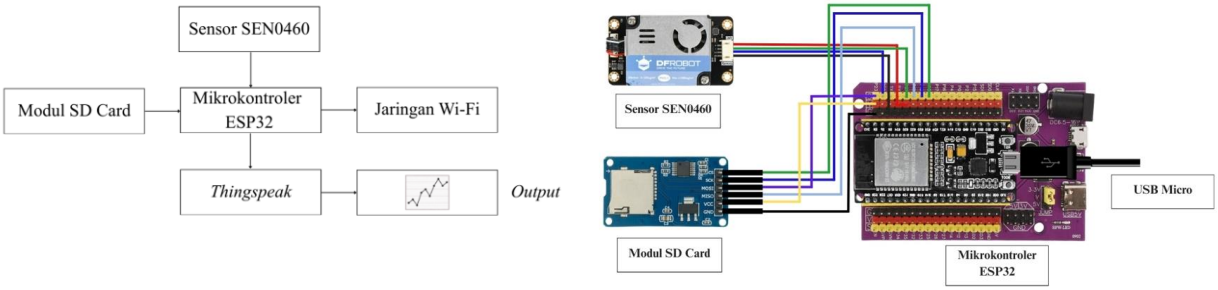
2.1. Perancangan sistem

Tahap perancangan sistem dimulai pada pemilihan komponen inti, yakni sensor SEN0460 sebagai akuisisi data, mikrokontroler sebagai pusat pengolahan dan pengiriman data, serta modul SD sebagai media penyimpanan lokal. Diagram blok dan skematik rangkaian sistem IoT ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar 1(a) memperlihatkan hubungan fungsional antar komponen sistem, sedangkan Gambar 1(b) menunjukkan konfigurasi perangkat keras dan koneksi antar komponen. Data konsentrasi partikulat yang diperoleh sensor SEN0460 diproses oleh mikrokontroler ESP32, kemudian disimpan pada modul *SD card* dan ditransmisikan ke platform *ThingSpeak* melalui jaringan Wi-Fi untuk pemantauan secara *real-time*. Seluruh sistem memperoleh suplai daya melalui koneksi USB yang terhubung ke ESP32, yang selanjutnya mendistribusikan daya ke komponen lain yang terintegrasi dalam sistem.

2.2. Perancangan sistem aplikasi

Pada tahap ini, sistem aplikasi dirancang dengan mengembangkan platform monitoring kualitas udara menggunakan *ThingSpeak* yang berfungsi sebagai sarana penyimpanan, visualisasi, dan analisis data secara *real-time*. Sistem ini diawali dengan pembuatan channel yang memuat *Field 1* untuk parameter PM2.5 dan

Field 2 untuk PM10, serta penggunaan *Write API Key* sebagai autentikasi pengiriman data dari EPS32 melalui *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) [12]. Data hasil pembacaan sensor SEN0460 dikirim secara berkala melalui jaringan Wi-Fi dengan interval pengiriman disesuaikan berdasarkan limit layanan platform dan kondisi kestabilan jaringan. Tampilan *dashboard* dirancang menggunakan grafik garis guna menampilkan tren konsentrasi partikulat, serta dilengkapi *widget* indikator yang menampilkan kategori kualitas udara berdasarkan standar BMKG. Secara keseluruhan, rangkaian kerja sistem mencakup pengambilan data oleh sensor, pengolahan data pada ESP32, pengiriman data ke platform *cloud*, dan pencadangan data pada *SD card*.



a) b)

Gambar 1. Arsitektur sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor SEN0460: (a) diagram blok sistem, dan (b) skematik rangkaian sistem.

2.3. Perancangan perangkat lunak

Pada tahap ini, pengembangan program dilakukan menggunakan Arduino IDE berbasis bahasa C++ pada ESP32, diawali dengan proses inisialisasi sensor SEN0460, modul *SD card*, dan jaringan Wi-Fi. Tahap berikutnya, sistem melakukan akuisisi data PM2.5 dan PM10 dalam interval tertentu, kemudian menjalankan proses validasi dan pemrosesan data sebelum dikirim ke *ThingSpeak* dan dicadangkan pada penyimpanan lokal. Penentuan jeda waktu akuisisi dan transmisi data disesuaikan dengan limit platform guna mempertahankan kestabilan sistem dan kelancaran komunikasi.

2.4. Perancangan kotak/ housing

Perancangan *housing* bertujuan melindungi seluruh komponen inti sistem agar dapat bekerja secara stabil pada kondisi luar ruangan. *Housing* berbentuk balok dengan dimensi 18 cm × 13 cm × 6,5 cm (volume ±1521 cm^3), dengan material aluminium alloy dirancang untuk mewadahi sensor SEN0460, ESP32, dan modul *SD card* dengan dilengkapi lubang ventilasi guna menjaga pembacaan konsentrasi PM2.5 dan PM10 tetap terjaga. Pada sisi bawah *housing* terdapat jalur kabel USB Micro sekaligus saluran udara masuk. Komponen internal ditempatkan menggunakan dudukan berbahan papan GRC dan kayu untuk menambah kestabilan dan meminimalkan risiko kerusakan akibat getaran atau benturan, sehingga keamanan dan keandalan sistem dapat dipertahankan dalam pemakaian jangka panjang.

2.5. Perakitan dan pengujian sistem IoT

Perakitan sistem IoT dilaksanakan dengan mengintegrasikan sensor SEN0460, modul *SD card*, dan mikrokontroler ESP32 sesuai dengan desain arsitektur yang telah dirancang. Setelah proses perakitan selesai, perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk mengakuisisi data PM2.5 dan PM10, menyimpan data pada *SD card*, serta mengirimkan data secara *real-time* ke platform *ThingSpeak* melalui jaringan Wi-Fi. Pengujian sistem dilakukan secara bertahap meliputi pengujian koneksi antar komponen, pengujian pembacaan sensor SEN0460, pengujian penyimpanan data pada *SD card*, pengujian data ke *ThingSpeak*, dan pengujian operasi sistem secara keseluruhan. Selain itu, dilakukan pengujian lapangan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan pemantauan kualitas udara secara *real-time* pada kondisi operasional sebenarnya guna memastikan seluruh perangkat terhubung dan berfungsi dengan baik.

2.6. Kalibrasi sistem IoT

Proses kalibrasi sistem IoT dilakukan melalui perbandingan hasil pembacaan sensor SEN0460 dengan alat standar Bosean dalam waktu dan kondisi pengukuran yang sama. Kalibrasi bertujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pengukuran konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 berdasarkan kategori kualitas udara yang digunakan oleh BMKG [13]. Kategori konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 berdasarkan kualitas udara menurut BMKG.

No	Kategori	Konsentrasi Partikulat PM2.5 dan PM10 (µg/m³)
1	Baik	0–15,5[a]
2	Sedang	15,5–55,4[a]
3	Tidak Sehat	55,5–150,4[a]
4	Sangat Tidak Sehat	150,5–250,4[a]
5	Berbahaya	>250,5[a]

[a] dari ref. [13].

Kinerja sistem dievaluasi menggunakan koefisien korelasi (r) untuk menilai tingkat hubungan linear antara hasil pengukuran sensor dan alat standar Bosean, *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur besarnya deviasi pengukuran, serta RMSE (%) untuk menunjukkan tingkat kesalahan relatif terhadap nilai rata-rata pengukuran [14, 15]. Koefisien korelasi (r), RMSE, dan RMSE (%) dihitung menggunakan Persamaan (1), (2), dan (3).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2} \quad (2)$$

$$RMSE\ (\%) = \frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3)$$

dengan (X_i) adalah hasil pengukuran sensor SEN0460, dan (Y_i) adalah hasil pengukuran alat standar Bosean, (n) adalah jumlah data pengamatan, ($\bar{X}$) adalah nilai rata-rata hasil pengukuran sensor SEN0460, dan ($\bar{Y}$) adalah nilai rata-rata hasil pengukuran alat standar Bosean. Hasil kalibrasi selanjutnya dikategorikan berdasarkan kombinasi antara nilai r dan RMSE (%). Klasifikasi penilaian kinerja sistem IoT berdasarkan kedua parameter tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi kinerja sistem berdasarkan nilai koefisien korelasi (r) dan RMSE (%).

No	Koefisien Korelasi (r)	RMSE (%)	Kategori Kinerja Sistem IoT	Keterangan
1	r ≥ 0,80[a]	< 10	Sangat Baik	Hubungan sangat kuat dan *error* sangat kecil
2	0,60 ≤ r < 0,80[a]	10–20	Baik	Hubungan kuat dengan kesalahan dapat diterima
3	0,40 ≤ r < 0,60[a]	20–30	Cukup	Hubungan sedang, perlu dilakukan kalibrasi
4	r < 0,40[a]	> 30	Buruk	Hubungan lemah dan *error* besar

[a] dari ref [14].

Kalibrasi dilakukan dengan mengoperasikan sistem IoT dan alat standar Bosean secara bersamaan pada lokasi dan periode pengukuran yang sama, sehingga kedua perangkat memperoleh paparan konsentrasi partikulat yang identik. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan perbedaan hasil pengukuran yang disebabkan oleh variasi kondisi lingkungan. Selanjutnya, analisis statistik dilakukan menggunakan koefisien korelasi (r) dan RMSE (%) untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem.

2.7. Pengambilan data

Pengambilan data kualitas udara dilaksanakan *real-time* melalui sistem IoT berbasis ESP32 yang sudah terkalibrasi, dengan fokus pengukuran pada konsentrasi PM2.5 dan PM10. Data direkam secara otomatis dan hasilnya dikirim ke *ThingSpeak*, sekaligus disimpan pada *SD card* sebagai cadangan guna memastikan keamanan data. Proses akuisisi data berlangsung secara berkelanjutan dengan interval tertentu untuk menangkap perubahan konsentrasi partikulat di udara. Pengambilan data dilakukan pada kondisi kering dan basah untuk melihat pengaruh cuaca terhadap sebaran partikulat, sedangkan perbandingan data *daring* dengan data lokal digunakan untuk mengevaluasi keandalan sistem.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Gambaran umum sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT

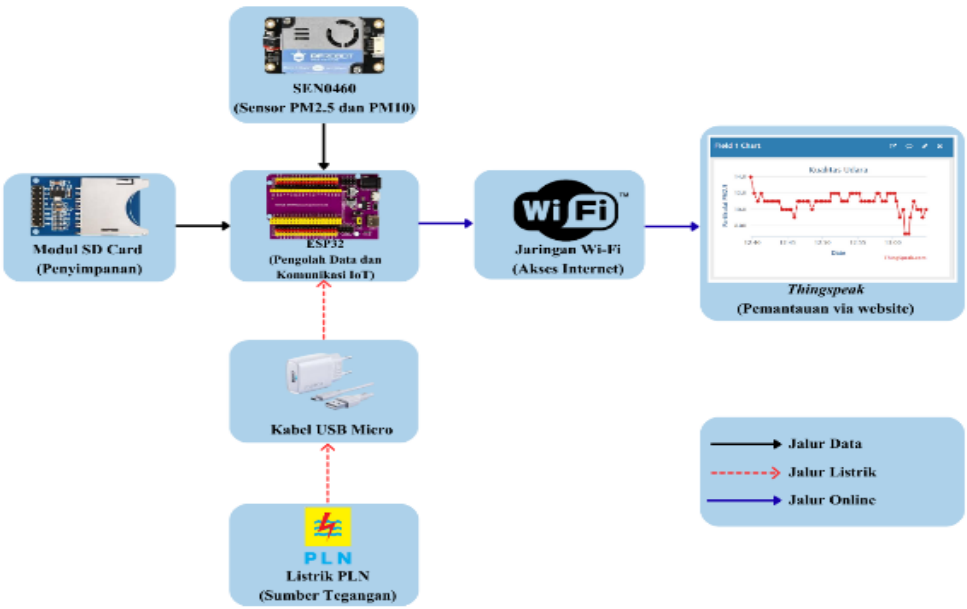
Sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT dirancang guna mengukur konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 secara *real-time* menggunakan sensor SEN0460. Parameter tersebut dimanfaatkan sebagai penunjuk tingkat pencemaran udara yang berpengaruh langsung terhadap kesehatan manusia. Prinsip kerja sensor SEN0460 mengacu pada metode *laser scattering*, yakni memancarkan sinar laser menuju partikel yang melayang di udara dan mendeteksi intensitas hamburan cahaya yang terbentuk [16]. Sinar optik yang dihasilkan selanjutnya diolah sirkuit internal sensor melalui penerapan teori MIE guna menetapkan ukuran partikel ekuivalen serta konsentrasi partikulat dalam satuan $\mu g/m^3$.

Hasil pengukuran diteruskan ke mikrokontroler ESP32 yang berperan sebagai pusat pemrosesan sistem. ESP32 bertugas memproses data, menyusun format pengiriman, dan meneruskan data tersebut ke platform *ThingSpeak* melalui jaringan Wi-Fi dengan metode HTTP *Request* dengan Channel ID yaitu 3137500. Di samping penyimpanan secara daring, data juga direkam secara lokal melalui modul *SD card* dengan format (.csv) sebagai sistem cadangan. Melalui satuan integrasi ini, sistem melaksanakan proses akuisisi, penyimpanan, serta visualisasi data secara simultan dan berkelanjutan.

Gambar 2(a) menunjukkan diagram alir sistem IoT yang terdiri atas tiga jalur utama, yaitu jalur listrik, jalur data, dan jalur komunikasi. Jalur listrik berfungsi menyalurkan daya dari sumber listrik melalui USB Micro untuk mengoperasikan mikrokontroler ESP32, sensor SEN0460, dan modul *SD card.* Jalur data menghubungkan sensor SEN0460 dengan ESP32 untuk proses akuisisi dan pengolahan data konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10, sedangkan jalur komunikasi digunakan untuk mengirimkan data hasil pengukuran ke platform *ThingSpeak* melalui jaringan Wi-Fi sehingga dapat dipantau secara *real-time*. Gambar 2(b) memperlihatkan implementasi perangkat keras di dalam *housing* berbahan aluminium alloy yang berfungsi melindungi komponen sistem dari gangguan lingkungan. *Housing* juga dilengkapi dengan ventilasi udara untuk menjaga sirkulasi udara di sekitar sensor sehingga proses pengukuran dapat berlangsung secara stabil.

3.2. Hasil pengujian sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT

Pengujian terhadap sistem IoT dilaksanakan guna menilai performa serta integrasi keseluruhan komponen, mencakup sensor SEN0460, mikrokontroler ESP32, transmisi data melalui jaringan Wi-Fi, tampilan data di platform *ThingSpeak*, dan penyimpanan data pada media lokal *SD card*. Hasil pengujian mengindikasikan sistem mampu beroperasi secara terintegrasi dalam proses pembacaan, transmisi, penyimpanan, serta visualisasi data secara *real-time*. Berdasarkan hasil pengujian awal pada Gambar 3, sensor SEN0460 menunjukkan kemampuan yang baik dalam mendeteksi perubahan konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10. Peningkatan konsentrasi partikulat akibat sumber emisi terukur secara jelas oleh sensor melalui kenaikan nilai PM2.5 dan PM10, sedangkan penurunan konsentrasi setelah sumber emisi dihilangkan juga dapat terdeteksi secara konsisten. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor memiliki respons yang cepat dan stabil terhadap perubahan kondisi lingkungan.

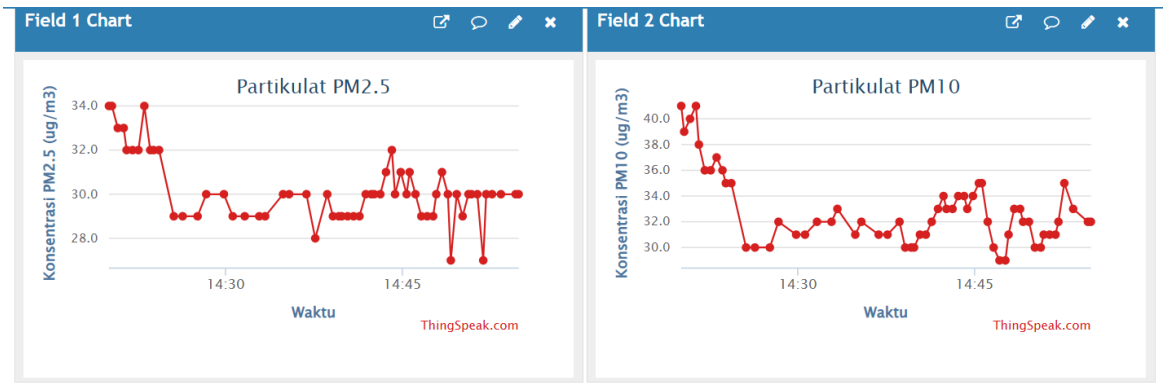


a).



b).

Gambar 2. Implementasi sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT: (a) diagram alir sistem, dan (b) tampilan sistem IoT dalam *housing*.

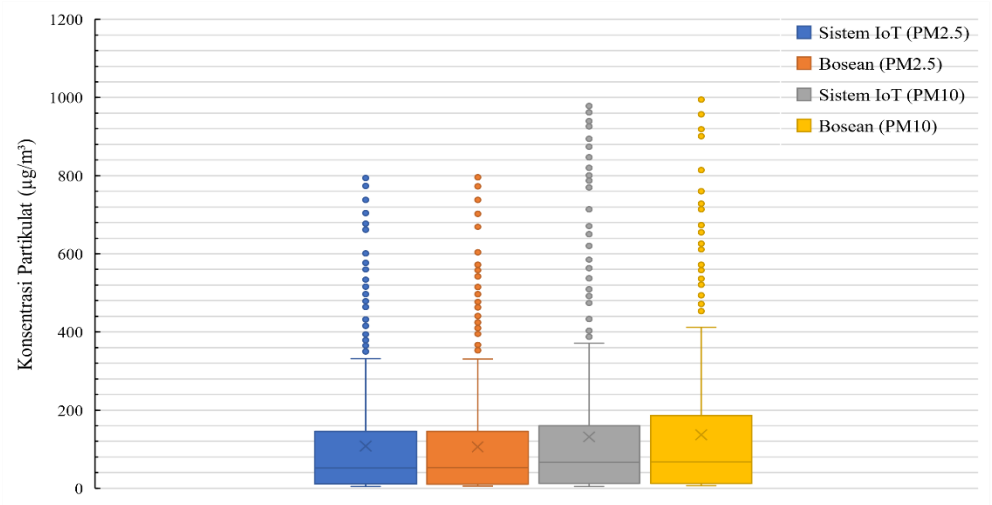


Gambar 3. Grafik perubahan konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 hasil pengukuran sensor SEN0460 pada platform *ThingSpeak*.

Temuan ini mengindikasikan sensor memiliki sensitivitas dan stabilitas yang baik dalam merespon dinamika kualitas udara. Selain itu, indikator kualitas udara pada platform *ThingSpeak* diperbarui secara otomatis berdasarkan kategori kualitas udara yang ditentukan dari konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 hasil pengukuran. Perubahan status indikator mengindikasikan bahwa klasifikasi kualitas udara yang diterapkan pada sistem IoT telah berfungsi dengan baik. Sistem dilengkapi penyimpanan lokal menggunakan *SD card* dengan format (.csv) untuk pencadangan data, sehingga data tetap aman meskipun terjadi gangguan jaringan.

3.3. Hasil kalibrasi sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT

Proses kalibrasi dilakukan untuk mengevaluasi akurasi dan kesesuaian respons sensor SEN0460 dalam mengukur konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap alat standar Bosean. Pengukuran dilakukan pada berbagai tingkat kualitas udara yang mencakup kategori baik (0–15,5 µg/m³) hingga berbahaya (>250,5 µg/m³) berdasarkan klasifikasi BMKG pada Tabel 1. Data dikumpulkan setiap 15 detik sehingga diperoleh sebanyak 614 data. Gambar 4 memperlihatkan distribusi konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 dari sistem IoT dan alat standar Bosean. Distribusi konsentrasi partikulat yang dihasilkan sistem IoT menunjukkan pola yang serupa dengan alat standar Bosean, yang ditunjukkan oleh kedekatan median dan rentang data pada kedua parameter.



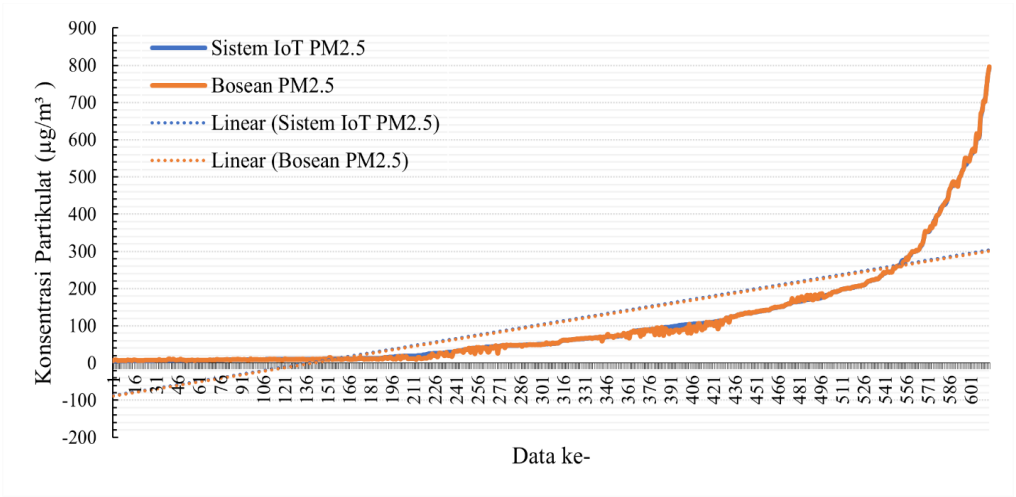
Gambar 4. Boxplot distribusi data konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10 antara sistem IoT dan alat standar Bosean pada proses kalibrasi.

Tabel 3 menunjukkan bahwa statistik sebaran data PM2.5 yang diperoleh dari sistem IoT sangat mendekati alat standar Bosean, dengan nilai median yang masing-masing 52 µg/m³ dan 52,5 µg/m³. Pada parameter PM10 diperoleh nilai median (Q2) dari sistem IoT dan alat standar Bosean juga menunjukkan kesesuaian yang baik, masing-masing sebesar 66 µg/m³ dan 67 µg/m³. Sementara itu, nilai kuartil ketiga (Q3) menunjukkan perbedaan yang lebih besar, yaitu sebesar 160 µg/m³ pada sistem IoT dan 185,25 µg/m³ pada alat standar Bosean. Perbedaan ini menunjukkan adanya deviasi pengukuran pada rentang konsentrasi PM10 yang lebih tinggi antara kedua perangkat. Namun demikian, kesamaan nilai median dan kuartil pertama menunjukkan bahwa sistem IoT mampu merepresentasikan kecenderungan pusat dan sebagian besar distribusi data PM10 dengan cukup baik.

Tabel 3. Statistik sebaran konsentrasi PM2.5 dan PM10 antara sistem IoT dan Bosean.

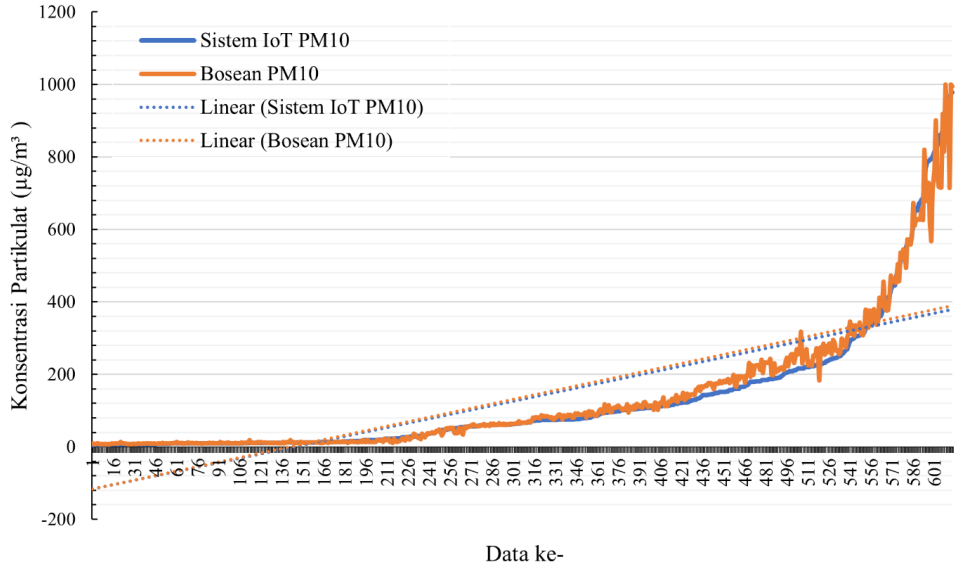
No	Analisis Statistik	PM2.5 (µg/m³)		PM10 (µg/m³)	
		Sistem IoT	Bosean	Sistem IoT	Bosean
1	Minimum	5	6	5	7
2	Maksimum	794	796	978	999
3	Q1	11	10	12	12
4	Q2	52	52,5	66	67
5	Q3	144,25	144,25	160	185,25

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Gambar 5 dan Tabel 4, pengukuran PM2.5 memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan alat standar Bosean, terutama pada rentang konsentrasi 55,5–250 µg/m³, dengan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,97–0,99 dan RMSE sebesar 1,20–7,93%. Secara keseluruhan, diperoleh nilai r sebesar 0,99 dan RMSE sebesar 4,79%, yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat serta tingkat kesalahan pengukuran yang relatif rendah. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem IoT mampu mengukur konsentrasi PM2.5 dengan tingkat akurasi yang baik dan hasil yang konsisten terhadap alat standar Bosean. Selain itu, metode *laser scattering* memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap partikel berukuran kecil, sehingga akurasi pengukuran PM2.5 cenderung lebih baik.



Gambar 5. Perbandingan hasil pengukuran konsentrasi PM2.5 antara sistem IoT dan alat standar Bosean.

Berbeda dengan PM2.5, hasil kalibrasi PM10 pada Gambar 6 dan Tabel 4 diperoleh nilai koefisien korelasi yang tetap tinggi, dengan r mencapai 0,98. Namun, nilai RMSE yang diperoleh masih relatif besar (>10%), yang mengindikasikan adanya deviasi pengukuran yang lebih tinggi dibandingkan dengan PM2.5. Secara keseluruhan, pengukuran PM10 menghasilkan nilai r sebesar 0,99 dan RMSE sebesar 20,01%, yang menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat dengan alat standar Bosean, tetapi tingkat kesalahan pengukuran masih cukup tinggi dibandingkan parameter PM2.5.



Gambar 6. Perbandingan hasil pengukuran konsentrasi PM10 antara sistem IoT dan alat standar Bosean.

Tabel 4. Nilai koefisien korelasi (r) dan RMSE hasil kalibrasi PM2.5 dan PM10 berdasarkan kategori konsentrasi partikulat.

No	Kategori	Rentang Konsentrasi (µg/m³)	PM2.5		PM10	
			r	RMSE (%)	r	RMSE (%)
1	Baik	0 – 15,5	0,80	15	0,78	15,55
2	Sedang	15,6 – 55,4	0,96	17,40	0,93	21,49
3	Tidak Sehat	55,5 – 150,4	0,97	7,93	0,98	12,04
4	Sangat Tidak Sehat	150,5 – 250,4	0,99	1,97	0,85	15,44
5	Berbahaya	> 250,5	0,99	1,20	0,96	12,08

Nilai RMSE yang lebih tinggi pada parameter PM10 dibandingkan PM2.5 menunjukkan adanya keterbatasan sensor dalam pengukuran konsentrasi partikulat PM10. Meskipun nilai koefisien korelasi pada kedua parameter tergolong sangat tinggi, hasil kalibrasi menunjukkan bahwa tingkat kesalahan pengukuran PM10 lebih besar dibandingkan PM2.5. Perbedaan tersebut terlihat dari nilai RMSE pada parameter PM2.5 sebesar 4,79% dan parameter PM10 mencapai 20,01%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem IoT yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dalam pengukuran PM2.5 dibandingkan PM10.

3.4. Hasil pengambilan data sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT

Proses pengambilan data dilaksanakan guna mengevaluasi performa sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT di lingkungan luar ruangan (*outdoor*) dalam dua kondisi, yakni kondisi kering (10–14 Februari 2026) dan kondisi basah (26 Februari 2026). Pengukuran dilaksanakan di Jl. Prof. M. Yamin, Gang Pemangkat 1, Kelurahan Akcaya, Pontianak Selatan. Klasifikasi kondisi cuaca selama periode pengukuran didasarkan pada data curah hujan harian yang diperoleh dari Stasiun Meteorologi BMKG Supadio, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data curah hujan harian selama periode pengukuran 10-28 Februari 2026.

No	Tanggal	Curah Hujan (mm)
1	10-02-2026	0[a]
2	11-02-2026	0[a]
3	12-02-2026	0[a]
4	13-02-2026	4,8[a]
5	14-02-2026	0[a]
6	15-02-2026	0[a]
7	16-02-2026	0[a]
8	17-02-2026	0,2[a]
9	18-02-2026	40,2[a]
10	19-02-2026	19,7[a]
11	20-02-2026	8[a]
12	21-02-2026	0,8[a]
13	22-02-2026	0[a]
14	23-02-2026	5,6[a]
15	24-02-2026	1,3[a]
16	25-02-2026	0,5[a]
17	26-02-2026	2,2[a]
18	27-02-2026	0[a]
19	28-02-2026	0[a]

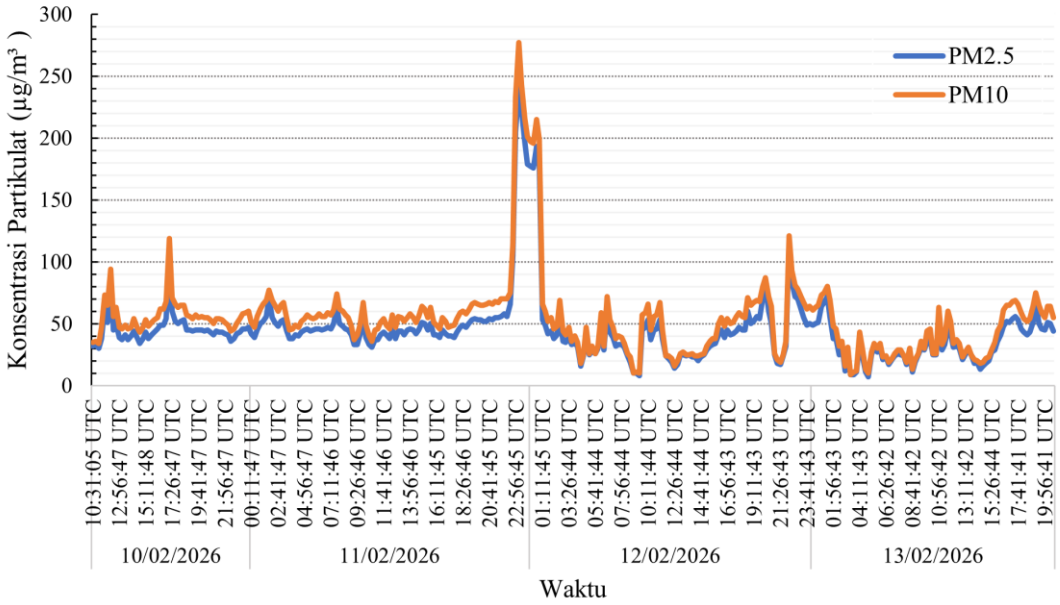
[a] dari ref [17].

Data direkam setiap 15 menit, mempertimbangkan keterbatasan layanan *ThingSpeak* yang membatasi 100 baris data, sehingga interval ini memungkinkan sistem IoT memonitor secara kontinu selama 24 jam. Selain dikirim ke *ThingSpeak*, seluruh data juga disimpan secara lokal menggunakan SD card sebagai cadangan penyimpanan.

Gambar 7 memperlihatkan variasi konsentrasi PM2.5 dan PM10 selama kondisi kering, dengan rentang konsentrasi masing-masing sebesar 7–242 µg/m³ dan 9–277 µg/m³. Konsentrasi tertinggi pada 12 Februari

2026, yaitu PM2.5 sebesar 242 µg/m³ dan PM10 sebesar 277 µg/m³. Tingginya konsentrasi partikulat pada periode tersebut diduga berkaitan dengan kondisi cuaca kering yang ditunjukkan pada Tabel 5. Di wilayah Pontianak, periode kering umumnya disertai penurunan kualitas udara akibat peningkatan akumulasi partikulat di atmosfer karena berkurangnya proses pencucian atmosfer oleh hujan dan kemunculan kabut asap, sehingga dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi PM2.5 dan PM10 di udara ambien.

Sebaliknya, konsentrasi terendah tercatat setelah terjadinya presipitasi, yaitu sebesar 7 µg/m³ untuk PM2.5 dan 10 µg/m³ untuk PM10. Hasil ini menunjukkan bahwa curah hujan berperan dalam mengurangi mengalami konsentrasi partikulat melalui proses deposisi basah (*wet deposition*). Berdasarkan statistik harian yang disajikan Tabel 6, konsentrasi rata-rata PM2.5 selama periode 10-14 Februari 2026 berada pada rentang 36,57–53,23 µg/m³, sedangkan rata-rata konsentrasi PM10 berada pada rentang 42,96–61,99 µg/m³. Nilai rata-rata PM10 yang lebih tinggi dibandingkan PM2.5 menunjukkan bahwa partikel kasar memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap konsentrasi partikulat di lokasi pengamatan selama periode penelitian.



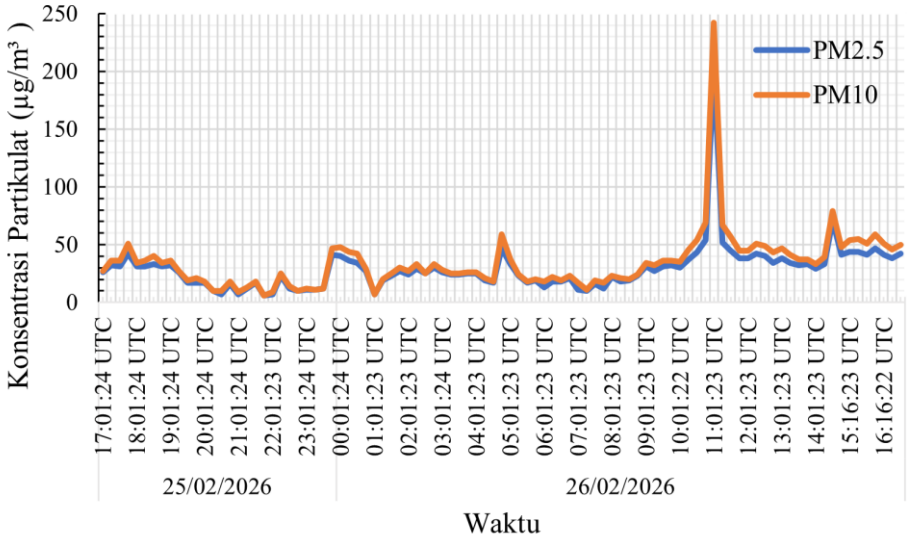
Gambar 7. Variasi konsentrasi PM2.5 dan PM10 hasil pengukuran sistem IoT kondisi kering periode 10–14 Februari 2026.

Tabel 6. Statistik harian PM2.5 dan PM10 periode 10–14 Februari 2026.

No	Tanggal	Minimum PM2.5 (µg/m³)	Maksimum PM2.5 (µg/m³)	Rata-rata PM2.5 (µg/m³)	Minimum PM10 (µg/m³)	Maksimum PM10 (µg/m³)	Rata-rata PM10 (µg/m³)
1	10 Februari 2026	30	87	43,92	34	94	53,12
2	11 Februari 2026	31	108	45,59	36	119	55,92
3	12 Februari 2026	8	242	53,23	10	277	61,99
4	13 Februari 2026	7	113	36,57	9	121	42,96
5	14 Februari 2026	41	67	49,33	52	75	61,53

Gambar 8 konsentrasi PM2.5 pada kondisi basah tercatat pada kisaran 6–201 µg/m³ dan PM10 pada kisaran 6–242 µg/m³, dengan nilai rata-rata konsentrasi partikulat masih dalam kategori sedang, yakni sebesar 29,27 µg/m³ dan 34,13 µg/m³ untuk masing-masing nilai PM2.5 dan PM10. Konsentrasi minimum tercatat saat dini hari hingga pagi (00:00-06:00) diperoleh nilai PM2.5 pada kisaran 6–42 µg/m³ dan nilai PM10 sekitar 6–51 µg/m³, mengindikasikan adanya kondisi atmosfer yang stabil dan permukaan yang lembap sehingga menghambat penyebaran polutan. Puncak konsentrasi maksimum terjadi sekitar pukul

18:01:21, diperoleh nilai PM2.5 dan PM10 mencapai 201 µg/m³ dan 242 µg/m³ yang masuk dalam kategori sangat tidak sehat. Hal ini disebabkan adanya aktivitas pembakaran di sekitar lokasi pengambilan data.



Gambar 8. Variasi konsentrasi PM2.5 dan PM10 hasil pengukuran sistem IoT kondisi basah periode 26 Februari 2026.

Hasil perbandingan data antara platform *ThingSpeak* dan penyimpanan lokal menunjukkan kesesuaian yang sangat baik untuk nilai konsentrasi PM2.5 dan PM10. Namun, ditemukan beberapa kendala teknis, antara lain adanya *timestamp* default (01/01/1970) dan kesalahan waktu pencatatan hingga tahun 2036 pada *SD card* yang disebabkan kegagalan sinkronisasi waktu melalui *Network Time Protocol* (NTP). Terdapat data yang tidak berhasil terkirim ke *ThingSpeak* disebabkan adanya gangguan koneksi atau batasan interval pengiriman pada kedua media penyimpanan, mengindikasikan kendala utama berkaitan dengan sinkronisasi waktu. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya ketergantungan terhadap kestabilan jaringan internet yang mempengaruhi proses transmisi data, serta kendala sinkronisasi waktu akibat kegagalan *Network Time Protocol* (NTP). Selain itu, Selain itu, hasil kalibrasi menunjukkan bahwa nilai RMSE PM10 (20,01%) masih lebih tinggi dibandingkan dengan PM2.5 (4,79%). Perbedaan ini mengindikasikan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dalam mengukur PM2.5 dibandingkan PM10. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan karakteristik sensor berbasis *laser scattering* yang memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap partikel berukuran kecil dibandingkan dengan partikel berukuran lebih besar.

4. Kesimpulan

Sistem pemantau kualitas udara berbasis IoT menggunakan sensor SEN0460 berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan performa yang baik dalam pengukuran PM2.5 dan PM10 secara *real-time*. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa pengukuran PM2.5 memiliki kinerja yang sangat baik dengan koefisien korelasi sebesar 0,99 dan nilai RMSE sebesar 4,79%. Sementara itu, pengukuran PM10 juga menunjukkan korelasi yang kuat terhadap instrumen referensi, namun dengan nilai RMSE yang lebih tinggi, yaitu 20,01%. Dengan demikian, sistem ini berpotensi sebagai solusi pemantauan kualitas udara yang efisien dan berkelanjutan, meskipun masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas sistem.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Program Penelitian Inovasi Universitas Tanjungpura Tahun 2025 atas dukungan dana yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penelitian ini hingga dapat diselesaikan dengan baik.

Pustaka

[1] J. S. Dyana, R. N. Amelia, S. A. Marsada Davita, *et al.*, Dampak Bahaya Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat di Perkotaan, *J. Ilm. Wahana Pendid.*, vol. 11, no. 1, 2025, pp. 132-140.

[2] N. Hartanto, Ni'matuzzahroh, D. J. Mauliya, *et al.*, Kajian Konsentrasi *Nitrogen Dioxide* (NO_2) dan *Sulphur Dioxide* (SO_2) di Kalimantan Menggunakan *Google Earth Engine*, *Envirotek: J. Ilm. Tek. Ling.*, vol. 16, no. 1, 2024, pp. 48-52.

[3] F. Nadziroh, N. Sa'adah, I. G. Puja Astawa, *et al.*, Sistem Monitoring Kualitas Udara sebagai Media Edukasi Kesadaran Lingkungan bagi Masyarakat Perkotaan, *J. Inov. Hasil Pengabdi. Masy.*, vol. 8, no. 2, 2025, pp. 454-466.

[4] I. Wellid, L. M. Simbolon, M. A. Falahuddin, *et al.*, Evaluasi Polusi Udara PM2.5 dan PM10 di Kota Bandung serta Kaitannya dengan Infeksi Saluran Pernapasan Akut, *J. Kesehat. Ling. Indones.*, vol. 23, no. 2, 2024, pp. 128-136.

[5] A. R. Perdana, A. I. Pangastuti and Y. D. Haryanto, Analysis of PM10 and PM2.5 Concentration at Monitoring Point of Central Jakarta HI Circle, February-October 2021 Data Periode, *J. Samudra Geogr.*, vol. 6, no. 1, 2023, pp. 1-8.

[6] H. Jusuf, E. Prasetya and N. Igirisa, Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pajanan *Particulate Matter* (PM_{10}) dan Karbon Monoksida (CO) pada Masyarakat di Desa Buata Kecamatan Botupingge, *Jurnal Sulolipu: Media Komun. Sivitas Akad. dan Mas.*, vol. 23, no. 1, 2023, pp. 187-198.

[7] K. Hasan, *Kualitas Udara Indonesia: Memperburuk pada Tahun 2023 tanpa Intervensi Efektif dan Terpicu El Niño. Bagaimana pada Tahun 2024?*, Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA), 2024. Available from: https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2024/04/ID-CREA_ID-AQ-decline-in-2023-due-to-lack-of-intervention-and-El-Nino.-What-about-2024.pdf, diakses 28 April 2026.

[8] E. Maulana and H. C. Haryanto, Bagaimana Kondisi Kesadaran Lingkungan Terkait Pencemaran Udara yang Dimiliki oleh Masyarakat Perkotaan? (Studi Pendahuluan pada Masyarakat di Jakarta), *INQUIRY: J. Ilmi. Psikol.*, vol. 11, no. 1, 2020, pp. 40-50.

[9] F. Haya, K. Nisa, R. F. Ladipasa, *et al.*, Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan Manusia, *WISSEN: J. Ilmu Sos. dan Hum.*, vol. 3, no. 2, 2025, pp. 180-190.

[10] M. N. Ubaidillah, M. R. Fithori and M. Z. Amirul Mukminin, Penanggulangan Pencemaran Udara Melalui Peraturan Daerah, *Ma'mal: J. Lab. Syariah. dan Huk.*, vol. 5, no. 1, 2024, pp. 1-8.

[11] J. Pebralia, H. Akhsan and I. Amri, Implementasi *Internet of Things* (IoT) dalam Monitoring Kualitas Udara pada Ruang Terbuka, *J. Kumparan Fis.*, vol. 7, no. 1, 2024, pp. 1-8.

[12] M. A. Vincensio Simon, W. Setiawan and N. P. Sastra, Rancang Bangun Sistem Peringatan Dini Bahaya Aktivitas Gunung Berapi Berbasis Mikrokontroler Arduino, *J. SPEKTRUM*, vol. 7, no. 3, 2020, pp. 42-54.

[13] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), *Konsentrasi Partikulat* ($PM_{2.5}$). Available from: https://iklim.bmkg.go.id/id/kualitas-udara-indonesia/, diakses 28 April 2026.

[14] A. H. Santoso, M. Saputra and F. N. Rizqy Hamka, PLTS sebagai *Backup Supply* pada Plant Hidroponik Nutrient Film Tehcnique (NFT) Berbasis IoT, *ELPOSYS: J. Sist. Kelistr.*, vol. 10, no. 1, 2023, pp. 19-23.

[15] A. I. Irawan, R. Patmasari, and M. R. Hidayat, Peningkatan Kinerja Sensor DS18B20 pada Sistem IoT Monitoring Suhu Kolam Ikan, *JTERA*, vol. 5, no. 1, 2020, pp. 101-110.

[16] DFRobot, *Getting Started with Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor*. Available from: http://wiki.dfrobot.com/gravity_pm2.5_air_quality_sensor_sku_sen0460, diakses 28 April 2026.

[17] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Data Curah Hujan Harian Stasiun Meteorologi Supadio Pontianak Periode Februari 2026, Data Online BMKG. Available from: https://dataonline.bmkg.go.id/, diakses 26 Februari 2026.