

Evaluasi Akurasi Sensor PMS5003 dan PMS9003 Terhadap Data Referensi Dinas Lingkungan Hidup Kota Jambi

Aida Khairani¹, Fernando Mersa Putra¹, Rizki Andre Handika^{1*}

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Kimia, dan Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

*Corresponding Author: Rizki Andre Handika (email: rizki_ah@unja.ac.id)

ABSTRACT

An alternative monitoring tool of fine particulate matter (PM_{2.5}) is required to support air quality management. It is due to the limited availability and high cost of high-standard instruments that encouraged the use of low-cost sensors based on the Internet of Things. This study aims to evaluate the accuracy of the PMS5003 and PMS9003 sensors against reference instrument of the Met One ES-642 operated by the Jambi City Environmental Agency, as well as to analyze the relationship between temperature and relative humidity with the measurement results. The study used a quantitative design with field observations conducted over 25 days during April–May 2026. Evaluation was carried out using descriptive statistics, Spearman correlation test, Friedman test, coefficient of determination, MBE, MAE, RMSE, and conversion of PM_{2.5} concentration into the Air Pollutant Standard Index (ISPU). The results show that both sensors were able to capture the pattern of PM_{2.5} concentration changes, but tended to produce higher values than the reference instrument. PMS5003 had an MBE of 6.17 µg/m³, MAE of 17.34 µg/m³, RMSE of 23.53 µg/m³, and R² of 0.12, while PMS9003 had an MBE of 10.12 µg/m³, MAE of 18.40 µg/m³, RMSE of 27.16 µg/m³, and R² of 0.11. Relative humidity showed a moderate positive relationship, while temperature showed a weak negative relationship. Low-cost sensors have the potential to be used for indicative monitoring, but their interpretation must take measurement bias and humidity conditions into account.

Article History

Received 2026-07-30

Revised 2026-07-31

Accepted 2026-07-31

Keywords

PM_{2.5};

Low-cost sensor;

Accuracy evaluation;

Optical sensor;

Air Quality monitoring.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Pendahuluan

Kualitas udara ambien merupakan salah satu komponen penting dalam pengelolaan lingkungan perkotaan karena berkaitan langsung dengan kesehatan masyarakat dan keberlanjutan [1]. Salah satu parameter pencemar yang perlu mendapat perhatian adalah partikulat halus PM_{2.5}, yang dengan ukurannya mampu masuk ke bagian dalam sistem pernapasan mencapai bagian paru-paru yang lebih dalam. Paparan jangka panjang terhadap PM_{2.5} ini berkaitan dengan berbagai gangguan kesehatan, termasuk gangguan pernapasan dan kardiovaskular, sehingga pemantauan konsentrasinya secara kontinu dan representatif menjadi bagian penting dalam pengendalian pencemaran udara [2,3].

Di Indonesia, pengendalian kualitas udara ambien mengacu pada baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 [4]. Pemantauan kualitas udara secara konvensional umumnya mengandalkan stasiun pemantauan dengan instrumen referensi atau instrumen berstandar tinggi [5]. Meskipun mampu menghasilkan data dengan tingkat keandalan yang tinggi, namun biaya pengadaan,

operasional, dan pemeliharaan instrumen tersebut dapat membatasi jumlah titik pemantauan. Kondisi ini menyebabkan data yang tersedia belum selalu mampu menggambarkan variasi spasial kualitas udara secara rinci pada skala lokal. Hal ini memerlukan strategi dan alternatif karena hingga saat ini instrumen pemantauan kualitas udara yang ada belum menjangkau seluruh kota di Indonesia. Sebagai salah satu alternatif untuk memperluas cakupan pemantauan, sensor partikulat berbiaya rendah (low-cost sensors) yang terintegrasi dengan teknologi Internet of Things (IoT) semakin banyak dikembangkan dan digunakan, termasuk sensor PMS5003 dan PMS9003 yang mengestimasi konsentrasi partikulat berdasarkan respons optik terhadap partikel di udara [1,6]. Berbagai penerapan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT telah dilaporkan, mulai dari pemantauan luar ruang menggunakan platform cloud seperti Ubidots [7] dan ThingSpeak [8], sistem notifikasi otomatis berbasis pembelajaran mesin [9], hingga aplikasi pada lingkungan spesifik seperti kabin kendaraan [10] dan sistem peringatan dini kebakaran hutan dan lahan [11], serta penerapan kecerdasan buatan berbasis logika fuzzy untuk pemrosesan data multisensor pada sistem pengukuran kualitas udara [12]. Sebelum berkembangnya modul komunikasi nirkabel berdaya rendah seperti LoRa, transmisi data pemantauan kualitas udara secara realtime juga pernah dilakukan melalui jaringan GSM menggunakan layanan SMS dan GPRS [13]. Ukurannya yang relatif ringkas, konsumsi daya yang rendah, dan kemampuan menghasilkan data secara kontinu menjadikan sensor berbiaya rendah berpotensi digunakan sebagai perangkat pemantauan tambahan [14].

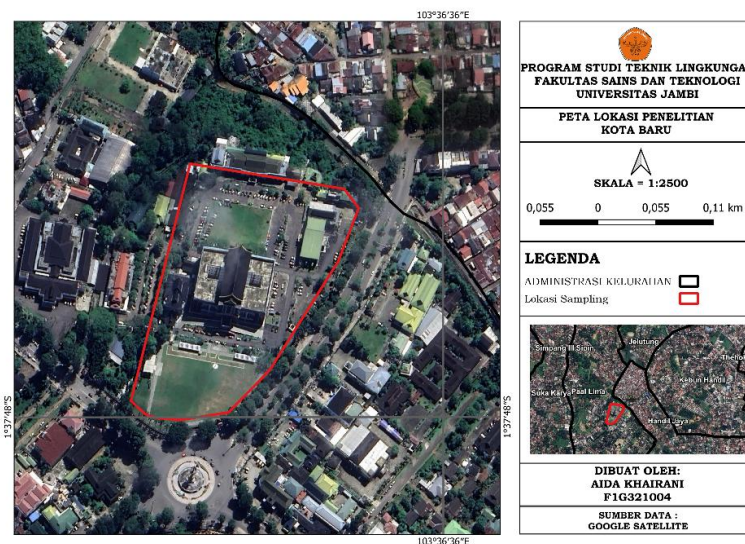
Namun, hasil pengukuran sensor partikulat optik dapat dipengaruhi oleh karakteristik aerosol dan kondisi lingkungan, terutama kelembapan relatif. Pada kondisi kelembapan tinggi, partikel higroskopis dapat menyerap uap air dan mengalami pertumbuhan ukuran yang memengaruhi intensitas hamburan cahaya yang diterima sensor dan selanjutnya memengaruhi estimasi konsentrasi $PM_{2.5}$ [3,6,15]. Oleh karena itu, evaluasi kinerja sensor melalui perbandingan langsung dengan instrumen referensi diperlukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran pada kondisi lingkungan tertentu.

Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi kinerja sensor partikulat berbiaya rendah pada berbagai kondisi lingkungan [1,3,6,15], sebagian besar studi tersebut berfokus pada satu jenis sensor secara tunggal, sementara perbandingan langsung antara dua model sensor optik (PMS5003 dan PMS9003) terhadap instrumen referensi yang sama masih terbatas dijumpai, khususnya pada kondisi iklim tropis dengan kelembapan tinggi seperti di Indonesia. Selain itu, penelitian sebelumnya di Kota Jambi [16] telah mengidentifikasi pola temporal $PM_{2.5}$ dan faktor meteorologi yang memengaruhinya, namun belum mengevaluasi sejauh mana sensor berbiaya rendah mampu merepresentasikan pola tersebut secara akurat dibandingkan instrumen referensi. Hal ini menunjukkan perlunya penelitian yang mengevaluasi akurasi sensor secara langsung pada lokasi yang sama, serta menganalisis pengaruh kondisi meteorologi lokal terhadap hasil pengukurannya.

Selain karakteristik sensor, kondisi meteorologi juga berperan dalam memengaruhi variasi konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara ambien. Penelitian sebelumnya di Kota Jambi menunjukkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ mengalami variasi temporal yang dipengaruhi oleh kondisi meteorologi dan dinamika atmosfer [16]. Temuan tersebut menunjukkan bahwa faktor meteorologi perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil pemantauan kualitas udara, termasuk dalam evaluasi kinerja sensor partikulat. Dengan demikian, penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor PMS5003 dan PMS9003 terhadap instrumen referensi Met One ES-642 milik Dinas Lingkungan Hidup Kota Jambi. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi akurasi kedua sensor, menganalisis hubungan suhu dan kelembapan relatif dengan pengukuran $PM_{2.5}$, serta mengidentifikasi perbedaan klasifikasi IPU berdasarkan hasil pengukuran sensor dan instrumen referensi.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Kawasan Perkantoran Kota Baru, Kota Jambi, tepatnya pada Stasiun Pemantauan Kualitas Udara Ambien (SPKUA) milik Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Jambi (**Gambar 1**). Lokasi penelitian dipilih karena dilengkapi dengan instrumen referensi *Met One ES-642 Remote Dust Monitor*, sehingga memungkinkan dilakukan evaluasi kinerja sensor berbiaya rendah melalui pengukuran secara berdampingan.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Kawasan Perkantoran Kota Baru, Kota Jambi.

Lokasi penelitian Gambar 1. merupakan kawasan perkantoran yang memiliki aktivitas kendaraan dan mobilitas manusia yang bervariasi sepanjang hari sehingga berpotensi memengaruhi konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara ambien. Untuk memperoleh kondisi pengukuran yang setara, sensor PMS5003 dan PMS9003 dipasang secara berdampingan (*co-location*) dengan instrumen referensi *Met One ES-642*, seperti ditunjukkan oleh **Gambar 2**, sehingga seluruh perangkat mengukur sampel udara pada kondisi lingkungan yang sama.

Gambar 2. Stasiun pemantauan berada di area lapangan Kantor Wali Kota Jambi, dengan jarak sekitar 15 meter dari jalan raya sehingga aktivitas kendaraan bermotor menjadi salah satu sumber emisi utama di sekitar lokasi penelitian. Stasiun ini berupa bangunan berbentuk kontainer berukuran sekitar 3 m × 2 m (panjang × lebar) dengan tinggi sekitar 3 meter dari permukaan tanah. Sensor PMS5003 dan PMS9003 dipasang pada jarak sekitar 0,5 meter dari inlet instrumen *Met One ES-642* sebagai alat referensi, sehingga kedua instrumen mengukur massa udara yang relatif sama dan hasil pengukuran dapat dibandingkan secara representatif.

Pengambilan data dilakukan selama periode April–Mei 2026. Dari total periode pengamatan tersebut, digunakan 25 hari data valid dalam analisis, mengikuti ketersediaan data pada instrumen referensi *Met One ES-642*. Pada sebagian hari lainnya ditemukan data kosong selama beberapa jam maupun data yang tidak lengkap, sehingga hari-hari tersebut tidak disertakan dalam analisis. Penggunaan data yang lengkap pada kedua sumber data bertujuan untuk mengurangi bias pembacaan sensor akibat perbandingan dengan data referensi yang tidak utuh, sehingga hasil evaluasi akurasi dapat mencerminkan kondisi pengukuran yang sebenarnya. Data $PM_{2.5}$ direkam setiap 5 menit, kemudian dilakukan pemeriksaan kualitas data (*data quality control*), penyesuaian waktu (*time synchronization*), dan perataan menjadi interval 30 menit agar sesuai dengan interval data instrumen referensi.



Gambar 2. Posisi pemasangan sensor terhadap instrumen referensi

Sistem Monitoring

Sistem pemantauan kualitas udara yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas dua sensor partikulat berbiaya rendah, yaitu PMS5003 dan PMS9003, yang berfungsi mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$ berdasarkan prinsip hamburan cahaya laser (*laser light scattering*). Kedua sensor diintegrasikan dengan sensor BME280 untuk merekam suhu dan kelembapan relatif [17], mikrokontroler ESP32 sebagai unit pengolah data, serta modul komunikasi LoRa untuk transmisi data secara nirkabel [18], dengan konfigurasi yang mengacu pada sistem monitoring $PM_{2.5}$ berbasis IoT dan LoRa yang serupa [19,20].

Sensor PMS5003 dan PMS9003 dipasang pada satu sistem pemantauan sehingga melakukan pengukuran secara bersamaan pada lokasi yang sama. Data hasil pengukuran direkam setiap 5 menit, kemudian dikirim melalui modul LoRa dan disimpan untuk proses pengolahan lebih lanjut. Pendekatan optimasi transmisi data serupa juga telah diterapkan pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis LoRa lainnya [21]. Selanjutnya, data melalui tahapan pemeriksaan kualitas data (*data quality control*), penyesuaian waktu (*time synchronization*), dan perataan menjadi interval 30 menit agar sesuai dengan interval data instrumen referensi *Met One ES-642*.

Sensor PMS5003 dan PMS9003 pada tahap awal dikalibrasi pada skala laboratorium menggunakan instrumen *TC-8100*. Namun, pada saat dilakukan pengukuran di lapangan, hasil kalibrasi tersebut menghasilkan nilai konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, kalibrasi menggunakan *TC-8100* dilepas dan sensor dikembalikan ke pengaturan kalibrasi bawaan pabrik (*factory calibration*), yang terbukti menghasilkan data lebih sesuai dengan kondisi lingkungan aktual di lapangan. Berdasarkan pertimbangan tersebut, seluruh data dalam penelitian ini menggunakan sensor dengan kalibrasi pabrik tanpa penyesuaian tambahan.

Tabel 1. Spesifikasi perangkat yang digunakan dalam sistem monitoring $PM_{2.5}$

Perangkat	Fungsi
PMS5003	Mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$
PMS9003	Mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$
BME280	Mengukur suhu dan kelembapan relatif
ESP32	Mengolah dan mengendalikan sistem monitoring
LoRa	Mengirim data secara nirkabel
Met One ES-642	Instrumen referensi pengukuran $PM_{2.5}$

Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data primer berupa konsentrasi PM_{2.5} hasil pengukuran sensor PMS5003 dan PMS9003 serta data suhu dan kelembapan relatif dari sensor BME280. Data sekunder berupa hasil pengukuran PM_{2.5} dari instrumen referensi *Met One ES-642* yang diperoleh dari DLH Kota Jambi.

Sensor melakukan perekaman data setiap 5 menit. Sebelum dianalisis, seluruh data melalui proses *quality control* untuk memastikan bahwa data yang digunakan merupakan data yang valid dan representatif. Data dinyatakan tidak valid dan dikeluarkan dari analisis apabila ditemukan gangguan teknis pada sistem monitoring, seperti listrik padam yang menyebabkan sistem berhenti merekam data, sensor mengalami eror atau kegagalan pembacaan, sensor mengalami kondisi *stuck* dengan nilai pembacaan yang tidak berubah dalam periode waktu tertentu, serta data yang hilang akibat kegagalan transmisi maupun penyimpanan. Selanjutnya data dirata-ratakan menjadi interval 30 menit agar sesuai dengan interval pengukuran instrumen referensi. Data hasil sinkronisasi kemudian diolah menjadi rata-rata harian sebagai dasar analisis statistik dan konversi menjadi nilai ISPU.

Analisis Data

Analisis statistik dalam penelitian ini dilakukan menggunakan dua perangkat lunak. Uji korelasi Spearman dan uji Friedman diolah menggunakan perangkat lunak SPSS, sedangkan perhitungan regresi linear sederhana serta evaluasi akurasi menggunakan MBE, MAE, dan RMSE dilakukan menggunakan Microsoft Excel. Analisis statistik dilakukan secara bertahap untuk mengevaluasi kinerja sensor terhadap instrumen referensi. Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data melalui nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan variasi konsentrasi PM_{2.5} hasil pengukuran masing-masing perangkat.

Uji normalitas dilakukan untuk menentukan metode analisis statistik yang sesuai. Karena data tidak berdistribusi normal, hubungan antara suhu, kelembapan relatif, dan konsentrasi PM_{2.5} dianalisis menggunakan korelasi Spearman, sedangkan perbedaan hasil pengukuran antarperangkat dianalisis menggunakan uji Friedman.

Evaluasi akurasi dilakukan menggunakan *Mean Bias Error (MBE)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, dan koefisien determinasi (R^2). MBE digunakan untuk mengetahui kecenderungan bias pengukuran, MAE dan RMSE digunakan untuk mengevaluasi besarnya penyimpangan hasil pengukuran sensor terhadap instrumen referensi, sedangkan R^2 digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian hubungan linier antara hasil pengukuran sensor dan instrumen referensi.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

dengan:

- x_i = konsentrasi PM_{2.5} hasil pengukuran sensor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- y_i = konsentrasi PM_{2.5} hasil pengukuran instrumen referensi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- n = jumlah data pengamatan

Selain itu, dilakukan analisis regresi linear sederhana untuk memperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang menunjukkan tingkat kesesuaian hubungan antara hasil pengukuran sensor dan instrumen referensi. Sebagai analisis aplikasi awal, konsentrasi rata-rata harian PM_{2.5} dikonversi menjadi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 [22] menggunakan persamaan interpolasi:

$$I = \frac{(I_a - I_b)}{(X_a - X_b)} (X_x - X_b) + I_b$$

dengan:

- I = nilai ISPU
- I_a = ISPU batas atas
- I_b = ISPU batas bawah
- X_a = Konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- X_b = Konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- X_x = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Hasil konversi digunakan untuk membandingkan klasifikasi kualitas udara yang diperoleh dari sensor PMS5003 dan PMS9003 terhadap instrumen referensi *Met One ES-642*.

Hasil dan Pembahasan

Pola Pengukuran Konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sensor PMS5003 dan PMS9003 merekam perubahan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ dengan pola temporal yang relatif searah selama periode pengamatan. Kedua sensor menunjukkan peningkatan dan penurunan konsentrasi pada waktu yang relatif sama, meskipun terdapat perbedaan pada besarnya nilai yang dihasilkan. Konsentrasi minimum yang tercatat pada PMS5003 adalah $22,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan PMS9003 sebesar $26,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai maksimum masing-masing sensor mencapai $66,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada PMS5003 dan $68,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada PMS9003. Puncak konsentrasi tertinggi pada kedua sensor terjadi pada 28 April 2026, sedangkan nilai terendah tercatat pada 12 Mei 2026. Secara umum, PMS9003 menghasilkan nilai konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan PMS5003 selama periode pengamatan.

Tabel 2. Statistik Deskriptif Konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ selama periode pengamatan

Parameter	PMS5003	PMS9003	<i>Met One ES-642</i>
Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	22,56	26,09	25,58
Maksimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	66,99	68,86	25,92
Rata-rata ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	32,31	36,05	25,79
Kecenderungan umum	Lebih tinggi dari referensi	Paling tinggi	Relatif stabil

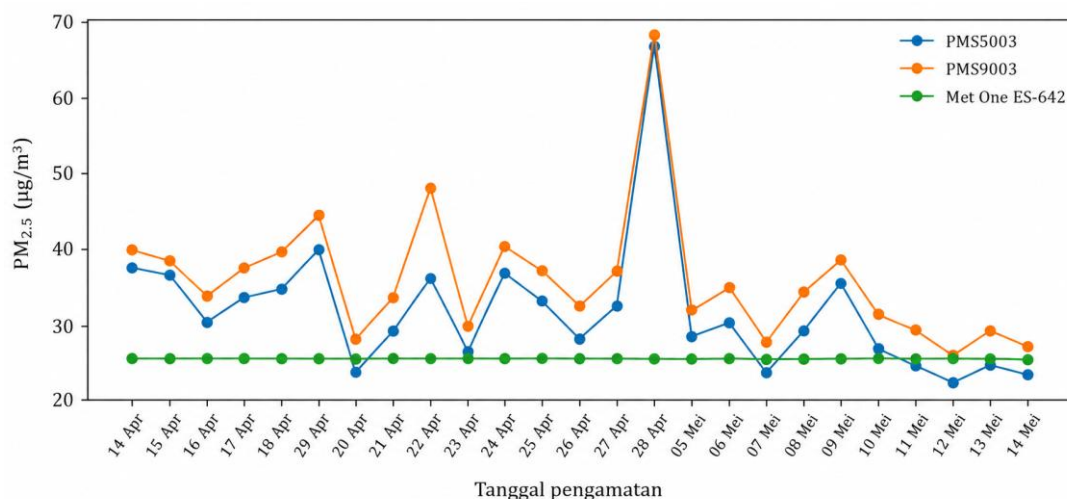
Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2026

Berdasarkan **Tabel 2**, PMS9003 memiliki nilai rata-rata konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ tertinggi, yaitu $36,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, diikuti PMS5003 sebesar $32,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara itu, *Met One ES-642* memiliki rata-rata konsentrasi sebesar $25,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dengan demikian, rata-rata hasil pengukuran PMS5003 lebih tinggi sekitar $6,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan PMS9003 lebih tinggi sekitar $10,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dibandingkan instrumen referensi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kedua sensor cenderung menghasilkan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ yang lebih tinggi dibandingkan *Met One ES-642*, dengan kecenderungan perbedaan yang lebih besar pada PMS9003. Selain menunjukkan perbedaan rata-rata, perbedaan rentang pengukuran terlihat dengan cukup jelas. PMS5003 memiliki rentang antara $22,56$ – $66,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan PMS9003 memiliki rentang $26,09$ – $68,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sebaliknya, *Met One ES-642* memiliki rentang yang jauh lebih sempit, yaitu $25,58$ – $25,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kedua sensor menghasilkan fluktuasi konsentrasi yang lebih besar selama periode pengamatan dibandingkan instrumen referensi. Variasi yang lebih besar pada hasil pengukuran sensor dapat menunjukkan respons yang lebih sensitif terhadap perubahan kondisi partikulat, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh karakteristik respons perangkat terhadap aerosol dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, nilai rata-rata yang lebih dekat dengan instrumen referensi tidak selalu menunjukkan bahwa

seluruh hasil pengukuran sensor memiliki kesesuaian yang baik. Sebaliknya, perbedaan fluktuasi antarperangkat perlu dipertimbangkan bersama indikator akurasi lainnya untuk memberikan gambaran kinerja sensor secara lebih menyeluruh.

Kecenderungan nilai pengukuran yang lebih tinggi pada kedua sensor juga sejalan dengan hasil evaluasi akurasi yang menunjukkan nilai MBE positif. Hal ini menunjukkan adanya kecenderungan bias positif, yaitu hasil pengukuran sensor secara umum berada di atas nilai yang dihasilkan oleh *Met One ES-642*. Namun, kecenderungan overestimasi tersebut perlu dipahami dalam konteks kondisi pengamatan pada penelitian ini. Hasil tersebut tidak secara langsung menunjukkan bahwa sensor akan selalu menghasilkan nilai yang lebih tinggi pada seluruh lokasi dan kondisi atmosfer. Pengujian pada periode dan lokasi yang lebih beragam diperlukan untuk menilai kestabilan karakteristik bias tersebut.

Gambar 3 menunjukkan pola perubahan rata-rata harian konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dihasilkan oleh PMS5003, PMS9003, dan *Met One ES-642*. Secara umum, kedua sensor menunjukkan pola perubahan yang relatif searah, yaitu mengalami peningkatan dan penurunan pada waktu pengamatan yang relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa sensor mampu menangkap adanya perubahan temporal konsentrasi partikulat selama periode penelitian. Meskipun demikian, terdapat perbedaan yang jelas pada besaran konsentrasi yang dihasilkan. PMS9003 secara umum berada pada tingkat konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan PMS5003, sedangkan kedua sensor cenderung menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan *Met One ES-642*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kesamaan pola perubahan tidak selalu diikuti oleh kesamaan nilai absolut. Dengan kata lain, sensor dapat menangkap kecenderungan perubahan konsentrasi, tetapi nilai yang dihasilkan belum tentu sama dengan pengukuran instrumen referensi. Perbedaan paling jelas terlihat pada 28 April 2026 ketika PMS5003 dan PMS9003 menunjukkan peningkatan konsentrasi yang tajam hingga mencapai nilai maksimum masing-masing sebesar $66,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $68,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada waktu yang sama, *Met One ES-642* tercatat sebesar $25,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa respons kedua sensor terhadap kondisi aerosol pada waktu tersebut lebih besar dibandingkan respons instrumen referensi. Kondisi ini sejalan dengan kecenderungan overestimasi yang ditunjukkan oleh nilai rata-rata dan MBE positif.



Gambar 3. Perbandingan rata-rata harian konsentrasi $PM_{2.5}$

Perbedaan respons antara sensor dan instrumen referensi dapat berkaitan dengan perbedaan karakteristik sistem pengukuran. Sensor partikulat berbiaya rendah dan instrumen referensi dapat memiliki prinsip pengukuran, sistem pengolahan sinyal, serta respons yang berbeda terhadap karakteristik aerosol. Ukuran, bentuk, komposisi, dan sifat optik partikel dapat memengaruhi respons perangkat terhadap udara yang sama. Oleh karena itu, perbedaan hasil pengukuran tidak hanya perlu dipahami sebagai perbedaan nilai konsentrasi, tetapi juga

sebagai perbedaan respons antarperangkat terhadap kondisi aerosol ambien. Secara keseluruhan, kedua sensor mampu untuk merekam perubahan temporal konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan pola yang relatif searah. Namun, nilai konsentrasi yang dihasilkan cenderung lebih tinggi dan menunjukkan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan instrumen referensi *Met One ES-642*.

Evaluasi Akurasi terhadap Data Referensi

Evaluasi akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran PMS5003 dan PMS9003 terhadap instrumen *Met One ES-642*. **Tabel 3** menunjukkan hasil evaluasi, dimana kedua sensor menunjukkan bias positif yang ditunjukkan oleh nilai *Mean Bias Error (MBE)* sebesar $+6,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada PMS5003 dan $+10,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada PMS9003. Nilai positif tersebut menunjukkan bahwa kedua sensor cenderung menghasilkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang lebih tinggi dibandingkan instrumen referensi. PMS9003 memiliki nilai MBE yang lebih besar sehingga menunjukkan kecenderungan overestimasi yang lebih tinggi dibandingkan PMS5003.

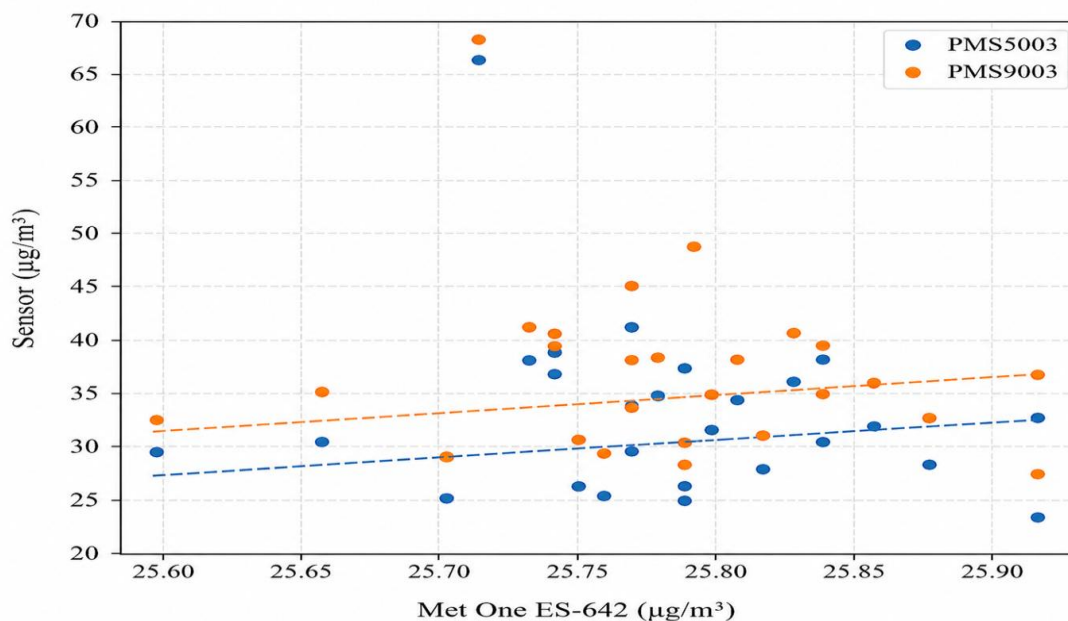
Tabel 3. Hasil evaluasi akurasi sensor terhadap instrumen *Met One ES-642*

Parameter evaluasi	PMS5003	PMS9003
MBE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	+6,17	+10,12
MAE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17,34	18,40
RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	23,53	27,16
R^2	0,12	0,11

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2026

PMS5003 memiliki nilai MAE sebesar $17,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan RMSE sebesar $23,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan PMS9003 memiliki nilai MAE sebesar $18,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan RMSE sebesar $27,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai MAE yang lebih rendah pada PMS5003 menunjukkan bahwa rata-rata penyimpangan absolut sensor tersebut terhadap instrumen referensi lebih kecil. Sementara itu, nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan bahwa PMS5003 memiliki penyimpangan pengukuran yang relatif lebih kecil, termasuk ketika terdapat perbedaan nilai yang besar pada waktu pengamatan tertentu. Berdasarkan ketiga indikator kesalahan tersebut, PMS5003 menunjukkan kinerja relatif lebih baik dibandingkan PMS9003 pada kondisi penelitian ini.

Nilai R^2 yang diperoleh sebesar 0,12 pada PMS5003 dan 0,11 pada PMS9003 menunjukkan bahwa hubungan linier antara hasil pengukuran sensor dan instrumen referensi tergolong rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran sensor belum mampu menjelaskan variasi data instrumen referensi secara kuat. Oleh karena itu, kemiripan pola naik-turun yang terlihat pada waktu tertentu tidak dapat secara langsung diartikan sebagai kesesuaian akurasi yang tinggi.



Gambar 4. Hubungan hasil pengukuran sensor dengan data referensi

Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara hasil pengukuran kedua sensor dan data *Met One ES-642*. Secara umum, titik-titik data menunjukkan penyebaran yang cukup besar sehingga hubungan antara hasil pengukuran sensor dan instrumen referensi tidak membentuk pola linier yang kuat. Kondisi tersebut sejalan dengan nilai R^2 yang rendah pada kedua sensor. PMS5003 memiliki nilai R^2 sedikit lebih tinggi dibandingkan PMS9003, yaitu 0,12 berbanding 0,11, tetapi perbedaannya relatif kecil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kemampuan sensor dalam mengikuti perubahan konsentrasi pada waktu tertentu tidak secara otomatis menunjukkan bahwa sensor memiliki kesesuaian nilai absolut yang tinggi terhadap instrumen referensi. Dengan kata lain, sensor dapat menunjukkan perubahan nilai ketika terjadi perubahan kondisi partikulat, tetapi besarnya konsentrasi yang dihasilkan belum tentu sama dengan nilai yang diukur oleh instrumen referensi. Oleh karena itu, kedua sensor lebih tepat diposisikan sebagai perangkat pemantauan indikatif dan pelengkap, bukan sebagai pengganti langsung instrumen referensi tanpa proses kalibrasi atau koreksi.

Perbedaan hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh perbedaan prinsip dan karakteristik sistem pengukuran. PMS5003 dan PMS9003 mengestimasi konsentrasi partikulat berdasarkan respons optik terhadap partikel yang melewati ruang deteksi, sedangkan *Met One ES-642* memiliki sistem pengukuran dan pengolahan data yang berbeda. Perbedaan karakteristik ukuran, bentuk, komposisi, dan sifat optik aerosol dapat menyebabkan perangkat memberikan respons yang berbeda terhadap kondisi udara yang sama. Oleh karena itu, perbedaan nilai yang dihasilkan tidak semata-mata dapat dipahami sebagai kesalahan sensor, tetapi juga sebagai perbedaan respons antar sistem pengukuran. Respons sensor optik terhadap karakteristik aerosol dan kondisi lingkungan merupakan salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi sensor partikulat berbiaya rendah [1, 3, 6].

Konsentrasi partikulat di lingkungan ambien juga dipengaruhi oleh berbagai faktor yang berubah secara simultan. Perbedaan kondisi aerosol, distribusi ukuran partikel, kondisi meteorologi, serta perbedaan posisi dan karakteristik inlet dapat memengaruhi hubungan antara hasil pengukuran sensor dan instrumen referensi. Faktor-faktor tersebut dapat menjadi salah satu alasan rendahnya kesesuaian linier yang diperoleh dalam penelitian ini. Dengan demikian, nilai R^2 yang rendah menunjukkan adanya keterbatasan kesesuaian numerik antara sensor dan instrumen referensi, tetapi tidak serta-merta menghilangkan potensi sensor sebagai perangkat pemantauan indikatif.

Hubungan Suhu dan Kelembapan Relatif dengan Pengukuran $PM_{2.5}$

Uji normalitas menunjukkan bahwa data tidak berdistribusi normal sehingga hubungan antara parameter meteorologi dan konsentrasi $PM_{2.5}$ dianalisis menggunakan korelasi Spearman. Hasil analisis menunjukkan bahwa suhu memiliki hubungan negatif dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diukur oleh kedua sensor, sedangkan kelembapan relatif memiliki hubungan positif. Berdasarkan **Tabel 4**, suhu memiliki nilai korelasi Spearman sebesar -0,326 terhadap PMS5003 dan -0,351 terhadap PMS9003. Nilai tersebut menunjukkan hubungan negatif dengan tingkat keeratan yang lemah. Artinya, peningkatan suhu cenderung diikuti oleh penurunan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang terukur oleh kedua sensor, meskipun hubungan tersebut tidak cukup kuat untuk menjelaskan perubahan konsentrasi secara keseluruhan.

Tabel 4. Korelasi Spearman antara kondisi meteorologi dan konsentrasi $PM_{2.5}$

Parameter	PMS5003 (rho)	PMS9003 (rho)	Interpretasi
Suhu	-0,326	-0,351	Negatif, lemah
Kelembapan relatif	+0,430	+0,456	Positif, sedang

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2026

Hubungan negatif antara suhu dan konsentrasi $PM_{2.5}$ dapat berkaitan dengan perubahan kondisi atmosfer selama periode pengamatan. Peningkatan suhu dapat berlangsung bersamaan dengan perubahan kondisi pencampuran udara yang memengaruhi proses dispersi partikulat. Namun, lemahnya hubungan yang diperoleh menunjukkan bahwa suhu bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan perubahan konsentrasi $PM_{2.5}$ pada lokasi penelitian. Variasi konsentrasi juga dapat dipengaruhi oleh sumber emisi, kondisi angin, aktivitas kendaraan, dan faktor atmosfer lainnya.

Berbeda dengan suhu, kelembapan relatif menunjukkan hubungan positif dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang diukur oleh kedua sensor. Nilai korelasi sebesar +0,430 pada PMS5003 dan +0,456 pada PMS9003 menunjukkan hubungan positif dengan tingkat keeratan sedang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan relatif cenderung diikuti oleh peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang terukur oleh sensor. Hubungan yang lebih kuat antara kelembapan relatif dan hasil pengukuran sensor dapat berkaitan dengan karakteristik pengukuran sensor partikulat berbasis optik. Pada kondisi kelembapan yang tinggi, partikel yang memiliki sifat higroskopis dapat menyerap uap air sehingga mengalami pertumbuhan higroskopis. Perubahan ukuran partikel tersebut dapat memengaruhi karakteristik hamburan cahaya yang diterima oleh sensor dan selanjutnya memengaruhi estimasi konsentrasi $PM_{2.5}$. Pengaruh kelembapan terhadap respons sensor partikulat optik juga menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi sensor berbiaya rendah [3, 6].

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kelembapan relatif memiliki hubungan yang lebih kuat terhadap hasil pengukuran $PM_{2.5}$ dibandingkan suhu. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa variasi konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Jambi dipengaruhi oleh faktor meteorologi, termasuk suhu, kelembapan, curah hujan, dan kecepatan angin [16]. Meskipun penelitian sebelumnya mengevaluasi pengaruh meteorologi terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$ secara umum, sedangkan penelitian ini mengevaluasi respons sensor terhadap kondisi meteorologi, kedua penelitian sama-sama menunjukkan bahwa faktor meteorologi perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil pengukuran kualitas udara. Dalam kondisi lingkungan tropis dengan perubahan kelembapan yang relatif besar, faktor tersebut menjadi penting dalam interpretasi data sensor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan kelembapan relatif dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ lebih kuat dibandingkan dengan hubungan suhu. Meskipun demikian, hasil korelasi ini tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan bahwa kelembapan merupakan satu-satunya penyebab perubahan konsentrasi $PM_{2.5}$. Korelasi menunjukkan adanya hubungan antara variabel, tetapi tidak secara langsung membuktikan hubungan sebab-akibat.

Selain itu, suhu dan kelembapan relatif dapat mengalami perubahan secara bersamaan sehingga pengaruh masing-masing parameter terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$ tidak sepenuhnya dapat dipisahkan melalui analisis korelasi sederhana. Perubahan suhu dapat memengaruhi kondisi pencampuran dan dispersi atmosfer, sedangkan perubahan kelembapan dapat memengaruhi sifat fisik partikulat dan respons sensor optik. Interaksi antara faktor-faktor tersebut menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi $PM_{2.5}$ kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor lingkungan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat menggunakan analisis multivariat untuk mengevaluasi pengaruh suhu, kelembapan relatif, dan parameter meteorologi lainnya secara simultan. Pendekatan tersebut juga dapat digunakan untuk mengembangkan model kalibrasi atau koreksi yang mempertimbangkan kondisi lingkungan selama pengukuran. Dengan demikian, pengaruh kondisi meteorologi terhadap kinerja sensor dapat dianalisis secara lebih komprehensif dan kesesuaian hasil pengukuran sensor terhadap instrumen referensi berpotensi ditingkatkan.

Analisis Perbedaan Klasifikasi Indeks Standar Pencemar Udara Berdasarkan Hasil Pengukuran Sensor

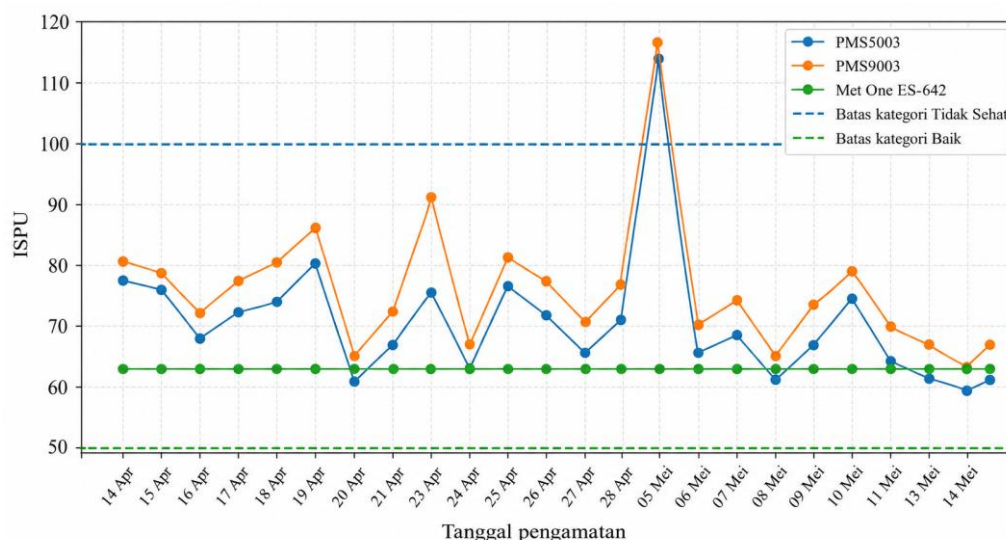
Nilai konsentrasi $PM_{2.5}$ hasil pengukuran PMS5003, PMS9003, dan *Met One ES-642* dikonversi menjadi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Pendekatan konversi konsentrasi $PM_{2.5}$ menjadi ISPU juga telah diterapkan pada penelitian kualitas udara ambien di Kota Surabaya [23]. Analisis ini dilakukan untuk membandingkan klasifikasi kualitas udara yang dihasilkan oleh kedua sensor dengan instrumen referensi. Berdasarkan hasil konversi, sebagian besar nilai ISPU dari ketiga sumber data berada pada kategori Sedang. Namun, rentang nilai ISPU yang dihasilkan oleh kedua sensor lebih lebar dibandingkan dengan *Met One ES-642*. PMS5003 menghasilkan rentang nilai ISPU sebesar 59,67–114,23, sedangkan PMS9003 menghasilkan rentang sebesar 64,01–116,53. Sementara itu, *Met One ES-642* menghasilkan rentang nilai yang lebih sempit, yaitu 63,37–63,80. Perbedaan rentang tersebut menunjukkan bahwa kedua sensor mengalami fluktuasi nilai yang lebih besar selama periode pengamatan dibandingkan dengan instrumen referensi.

Tabel 5. Ringkasan hasil konversi konsentrasi $PM_{2.5}$ menjadi ISPU

Sumber data	Rentang ISPU	Kategori dominan	Kejadian penting
PMS5003	59,67–114,23	Sedang	Tidak Sehat pada 28 April
PMS9003	64,01–116,53	Sedang	Tidak Sehat pada 28 April
<i>Met One ES-642</i>	63,37–63,80	Sedang	Tidak Sehat tidak teridentifikasi

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2026

Tabel 5 menunjukkan bahwa PMS9003 menghasilkan nilai ISPU maksimum sebesar 116,53, sedangkan PMS5003 mencapai 114,23. Kedua nilai tersebut termasuk dalam kategori Tidak Sehat. Sementara itu, nilai maksimum yang dihasilkan oleh *Met One ES-642* sebesar 63,80 masih berada pada kategori Sedang. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ yang lebih tinggi pada hasil pengukuran sensor dapat menghasilkan klasifikasi kualitas udara yang berbeda dibandingkan dengan instrumen referensi. Perbedaan klasifikasi paling jelas terjadi pada 28 April 2026. Pada tanggal tersebut, PMS5003 menghasilkan nilai ISPU sebesar 114,23 dan PMS9003 sebesar 116,53 sehingga keduanya termasuk kategori Tidak Sehat. Sebaliknya, *Met One ES-642* menghasilkan nilai ISPU sebesar 63,56 yang masih berada pada kategori Sedang. Dengan demikian, pada waktu pengamatan yang sama, hasil pengukuran sensor menghasilkan klasifikasi kualitas udara yang lebih buruk dibandingkan instrumen referensi.



Gambar 5. Perbandingan Nilai ISPU Berdasarkan Hasil Pengukuran Sensor dan Instrumen Referensi

Gambar 5 menunjukkan pola perubahan nilai ISPU yang dihasilkan oleh PMS5003, PMS9003, dan *Met One ES-642* selama periode pengamatan. Secara umum, PMS5003 dan PMS9003 menunjukkan fluktuasi nilai yang lebih besar dibandingkan dengan instrumen referensi. Kedua sensor juga menunjukkan perubahan nilai pada waktu pengamatan yang relatif sama, meskipun besaran nilai yang dihasilkan berbeda. PMS9003 cenderung menghasilkan nilai ISPU yang lebih tinggi dibandingkan PMS5003, yang sejalan dengan kecenderungan PMS9003 menghasilkan konsentrasi $PM_{2.5}$ lebih tinggi selama periode pengamatan. Peningkatan nilai ISPU yang paling menonjol terjadi pada 28 April 2026. Pada waktu tersebut, kedua sensor menghasilkan nilai ISPU di atas batas kategori Sedang sehingga masuk ke kategori Tidak Sehat. Sebaliknya, nilai ISPU dari *Met One ES-642* tetap berada pada kategori Sedang. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa fluktuasi konsentrasi yang terukur oleh sensor dapat menghasilkan perubahan kategori ISPU yang tidak ditunjukkan oleh instrumen referensi.

Perbedaan hasil klasifikasi tersebut berkaitan dengan kecenderungan sensor dalam menghasilkan nilai konsentrasi $PM_{2.5}$ yang lebih tinggi dibandingkan instrumen referensi. Hasil evaluasi akurasi menunjukkan bahwa PMS5003 dan PMS9003 memiliki nilai MBE positif, yang menunjukkan adanya kecenderungan overestimasi. Kecenderungan tersebut dapat memengaruhi hasil konversi ke ISPU karena peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$ akan menghasilkan peningkatan nilai ISPU. Dengan demikian, bias pengukuran sensor tidak hanya memengaruhi perbedaan nilai konsentrasi secara numerik, tetapi juga dapat menyebabkan perbedaan interpretasi kategori kualitas udara.

Sensor berbiaya rendah berpotensi digunakan sebagai perangkat pemantauan indikatif untuk memantau perubahan kualitas udara secara kontinu dan memperluas cakupan pengamatan. Namun, hasil klasifikasi ISPU menunjukkan bahwa penggunaan data sensor perlu mempertimbangkan karakteristik akurasi dan bias pengukurannya. Oleh karena itu, penerapan kalibrasi atau koreksi data diperlukan apabila hasil pengukuran sensor digunakan untuk menentukan kategori kualitas udara secara lebih akurat.

Secara keseluruhan, PMS5003 menunjukkan kinerja relatif lebih baik dibandingkan PMS9003 berdasarkan nilai MBE, MAE, dan RMSE yang lebih rendah. Namun, kedua sensor masih menunjukkan perbedaan klasifikasi ISPU terhadap instrumen *Met One ES-642* pada waktu tertentu. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor berbiaya rendah lebih tepat digunakan sebagai perangkat pemantauan indikatif dan pelengkap untuk memperluas cakupan pemantauan kualitas udara, bukan sebagai pengganti langsung instrumen referensi tanpa proses evaluasi dan koreksi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan evaluasi kinerja yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa Sensor PMS5003 dan PMS9003 mampu merekam pola perubahan konsentrasi $PM_{2.5}$ selama periode pengamatan, tetapi keduanya cenderung menghasilkan nilai lebih tinggi dibandingkan instrumen *Met One ES-642 Remote Dust Monitor*. PMS5003 memiliki MBE 6,17 $\mu g/m^3$, MAE 17,34 $\mu g/m^3$, RMSE 23,53 $\mu g/m^3$, dan R^2 0,12, sedangkan PMS9003 memiliki MBE 10,12 $\mu g/m^3$, MAE 18,40 $\mu g/m^3$, RMSE 27,16 $\mu g/m^3$, dan R^2 0,11. Berdasarkan indikator kesalahan, PMS5003 menunjukkan kinerja relatif lebih baik.

Kelembapan relatif memiliki hubungan positif sedang dengan hasil pengukuran $PM_{2.5}$, sedangkan suhu memiliki hubungan negatif lemah. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi meteorologi, terutama kelembapan relatif, perlu dipertimbangkan dalam evaluasi sensor optik. Perbedaan hasil pengukuran juga berdampak pada klasifikasi ISPU, karena pada 28 April 2026 kedua sensor menunjukkan kategori Tidak Sehat sementara instrumen referensi masih berada pada kategori Sedang. Sensor PMS5003 dan PMS9003 berpotensi digunakan untuk pemantauan indikatif dan perluasan cakupan pemantauan kualitas udara, tetapi penerapan lebih lanjut perlu didukung kalibrasi dan model koreksi yang mempertimbangkan kondisi kelembapan.

Referensi

- [1] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, "Optical particulate matter sensors in $PM_{2.5}$ measurements in atmospheric air," *E3S Web of Conferences*, vol. 44, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20184400006.
- [2] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, "Evaluation of low-cost sensors for ambient PM measurements," *Journal of Sensors*, vol. 2018, 2018.
- [3] R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, and L. Morawska, "The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 11, no. 8, pp. 4883–4890, 2018, doi: 10.5194/amt-11-4883-2018.
- [4] Pemerintah Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Jakarta, 2021.
- [5] T. V. Damayanti and R. E. Handriyono, "Monitoring kualitas udara ambien melalui stasiun pemantau kualitas udara Wonorejo, Kebonsari dan Tandes Kota Surabaya," *Environmental Engineering Journal ITATS*, vol. 2, no. 1, pp. 11–18, 2022.
- [6] T. Zheng et al., "Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 11, no. 8, pp. 4823–4846, 2018, doi: 10.5194/amt-11-4823-2018.

-
- [7] R. Teguh, E. D. Oktaviyani, and K. A. Mempun, "Rancang bangun desain Internet of Things untuk pemantauan kualitas udara pada studi kasus polusi udara," *Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 12, no. 2, pp. 47–58, 2018.
- [8] A. D. Ramadhani et al., "Klasifikasi dan monitoring kualitas udara dalam ruangan menggunakan Thingspeak," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 10, no. 1, pp. 1–5, 2023.
- [9] D. N. Azizah et al., "Internet of Things based air quality monitoring system with automatic notification," 2025.
- [10] M. Fernando and Suharjito, "In-car air quality notification using Internet of Things platform," *EMACS Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 53–61, 2023.
- [11] A. N. A. Muhid et al., "Sistem early warning deteksi kualitas udara berbasis IoT," vol. 7, no. 2, pp. 402–412, 2024.
- [12] J. Prayudha, A. Pranata, and A. Al Hafiz, "Implementasi metode fuzzy logic untuk sistem pengukuran kualitas udara di Kota Medan berbasis Internet of Things," *Jurteksi*, vol. 4, no. 2, pp. 141–148, 2018.
- [13] C. Iswahyudi and M. A. Novianta, "Evaluasi sistem monitoring kualitas udara secara realtime berbasis Arduino GSM Shield," 2019.
- [14] T. T. Okaem, Y. Yohandri, N. Y. Sudiar, and Hamdi, "Pengembangan instrumen pengukuran kualitas udara menggunakan sensor PMS7003," *Megasains*, vol. 13, no. 1, pp. 31–38, 2022.
- [15] M. Tagle et al., "Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, 2020, doi: 10.1007/s10661-020-8118-4.
- [16] B. Fajar, R. A. Handika, M. Damris, K. R. S. Wiharja, E. Mutmainnah, and N. Mohammad, "PM2.5 Temporal Pattern in Jambi City: Meteorological Drivers and Air Mass Trajectory Analysis," *Jurnal Presipitasi*, vol. 23, no. 2, 2026.
- [17] A. H. Saptadi and A. Kiswanto, "Rancang bangun web server penampil data cuaca berbasis Arduino menggunakan sensor BME280 dan BH1750FVI," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi*, vol. 2, no. 2, pp. 112–121, 2020.
- [18] A. Ramadhani et al., "Data komunikasi secara real time menggunakan LoRa berbasis Internet of Things untuk pembuatan weather station," *Jurnal Elektro Telekomunikasi Terapan*, vol. 8, no. 1, pp. 1007–1009, 2021.
- [19] M. I. Mutawaqil, "Rancang bangun alat monitoring kualitas udara PM2.5 berbasis IoT dan LoRa dengan sistem topologi star," Skripsi, Universitas Jambi, 2025.
- [20] A. Arifin, "Perancangan sistem monitoring kualitas udara real time basis wireless sensor network dan edge computing," 2025.

-
- [21] D. I. Maulana et al., "Data duplication detection in IoT-based air quality monitoring system," vol. 14, no. 2, pp. 138–144, 2025.
- [22] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara, Jakarta, 2020.
- [23] D. K. Nurlaili and N. Hendrasarie, "Analisa kualitas lingkungan udara ambien PM2.5 di Kota Surabaya," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 7988–7995, 2023.