

PEMANTAUAN BERBASIS IoT TERHADAP VARIASI TEMPORAL PARTIKULAT, POLUTAN GAS, DAN MIKROKLIMAT DI SEKITAR FASILITAS PENAMPUNGAN SAMPAH

Evy Kusumaningrum¹, Nurul Muyasaroh², Dedy Hariyadi³, Helmi Danang Pamungkas⁴

¹Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Yogyakarta, Jl. Janti KM. 4 Gedongkuning, Yogyakarta
Email: evy@ity.ac.id

²Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Yogyakarta, Jl. Janti KM. 4 Gedongkuning, Yogyakarta
Email: nurulmuyasaroh@ity.ac.id

³Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta, Jl. Siliwangi, Ringroad Barat, Banyuraden, Gamping, Sleman, Yogyakarta
Email: dedy@unjaya.ac.id

ABSTRAK

Pemantauan beresolusi waktu tinggi diperlukan untuk menggambarkan perubahan kualitas udara di sekitar tempat penampungan sementara (TPS) sampah yang dapat dipengaruhi oleh pembakaran, bongkar-muat, lalu lintas, dan kondisi mikroklimat. Penelitian ini bertujuan mendeskripsikan distribusi multiparameter, membandingkan variasi antarmhari dan blok waktu, mengevaluasi hubungan antarparameter, serta mengidentifikasi keterbatasan mutu data selama sepuluh hari pemantauan. Studi observasional eksploratif menggunakan sensor AQD-26010 yang terintegrasi dengan RUT200 dan TUYA Smart Cloud untuk mencatat PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, CO, CO₂, HCHO, TVOC, suhu, kelembapan, dan cuaca setiap 15 menit pada pukul 06.00-18.00, kemudian menganalisis 490 observasi dengan statistik deskriptif, korelasi Spearman, uji Kruskal-Wallis, dan koreksi Benjamini-Hochberg. Median (IQR) PM_{2,5}, PM_{1,0}, dan PM₁₀ masing-masing sebesar 52 (32,25-127), 33 (21-85), dan 59 (38-146) dalam satuan keluaran alat. Ketiga fraksi partikulat berkorelasi kuat ($\rho=0,755-0,927$), HCHO dan TVOC berkorelasi sedang ($\rho=0,403$), sedangkan suhu dan kelembapan berkorelasi negatif sangat kuat ($\rho=-0,955$; $n=343$). Perbedaan antarmhari ditemukan pada ketiga fraksi partikulat, HCHO, TVOC, suhu, dan kelembapan (p terkoreksi $<0,05$). Temuan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kualitas udara di lokasi pemantauan bersifat temporal dan respons antarsensor saling berkaitan, tetapi pengaruh sumber tertentu belum dapat dipastikan tanpa data aktivitas dan meteorologi yang lebih lengkap. Pemantauan berbasis IoT berpotensi mendukung deteksi episode pencemaran dan perencanaan pengelolaan lingkungan di sekitar TPS, namun interpretasi baku mutu harus ditunda sampai satuan, tanggal hari ke-8-10, dan kalibrasi alat terverifikasi.

Kata kunci: Internet of Things; kualitas udara; partikulat; TPS sampah; variasi temporal

IoT-BASED MONITORING OF TEMPORAL VARIATIONS IN PARTICULATE MATTER, GASEOUS POLLUTANTS, AND MICROCLIMATE AROUND A WASTE STORAGE FACILITY

ABSTRACT

High-temporal-resolution monitoring is useful for characterizing air-quality changes near waste transfer stations. This exploratory observational study analyzed particulate matter (PM_{1.0}, PM_{2.5}, and PM₁₀), CO, CO₂, HCHO, TVOC, temperature, humidity, and weather at a waste transfer station anonymized as Site X. An AQD-26010 sensor integrated with an RUT200 router and TUYA Smart Cloud was installed approximately 3 m above ground and 7.5-9.5 m from the combustion source. Measurements were recorded every 15 minutes from 06:00 to 18:00 for 10 observation days ($n=490$). Data were summarized using medians and interquartile ranges; associations were assessed using Spearman correlation, while between-day and time-block variation was explored using Kruskal-Wallis tests with Benjamini-Hochberg correction. Median (IQR) PM_{2.5}, PM_{1.0}, and PM₁₀ were 52 (32.25-127), 33 (21-85), and 59 (38-146), respectively, in instrument-output units. Particulate fractions were strongly correlated ($\rho=0.755-0.927$); HCHO and TVOC showed a moderate correlation ($\rho=0.403$). Temperature and humidity were strongly inversely correlated ($\rho=-0.955$; $n=343$). Significant between-day differences were found for particulate fractions, HCHO, TVOC, temperature, and humidity (adjusted $p<0.05$). The

observations indicate marked temporal variability and linked sensor responses. Regulatory interpretation is deferred pending verification of units, dates for days 8-10, and sensor calibration.

Keywords: air quality; Internet of Things; particulate matter; temporal variability; waste transfer station

PENDAHULUAN

Pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) terhadap variasi temporal partikulat, polutan gas, dan mikroklimat di sekitar fasilitas penampungan sampah diperlukan untuk menggambarkan perubahan kualitas udara secara rinci. Kegiatan pembakaran residu, bongkar-muat sampah, dan lalu lintas kendaraan berpotensi menghasilkan partikulat dan polutan gas dengan konsentrasi yang berubah menurut waktu. Pembakaran terbuka sampah kota diketahui melepaskan PM_{2,5}, PM₁₀, CO, dan senyawa organik volatil (Das et al., 2018; Ramadan et al., 2022), sedangkan fasilitas pengelolaan dan transfer sampah dapat menjadi sumber partikulat, VOC, serta gangguan bau (Liu & Zheng, 2020; Raza et al., 2021; Chai et al., 2022). PM_{2,5} dan PM₁₀ perlu mendapat perhatian karena berkaitan dengan dampak kesehatan, sehingga pemantauannya relevan dengan pedoman kualitas udara World Health Organization (WHO, 2021) dan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 (Pemerintah Republik Indonesia, 2021).

Sensor berbiaya rendah yang terhubung melalui IoT memungkinkan pemantauan kualitas udara dengan resolusi waktu tinggi dan biaya operasional yang relatif rendah. Penerapan sebelumnya menunjukkan kegunaan IoT untuk pemantauan kualitas udara di perlintasan kereta api dan lingkungan bangunan sehat (Kusumaningrum et al., 2023, 2024). Teknologi ini dapat memperluas cakupan spasial dan temporal ketika instrumen referensi terbatas (Snyder et al., 2013; Kumar et al., 2015; Johnston et al., 2019). Namun, evaluasi lapangan dan jangka panjang menunjukkan bahwa keluaran sensor partikulat optik dapat berbeda dari instrumen acuan dan berubah selama penggunaan (Crilley et al., 2018; Lee et al., 2020). Respons sensor juga dipengaruhi oleh kelembapan, suhu, komposisi aerosol, variasi antarsensor, serta kondisi lingkungan (Jayaratne et al., 2018; Alfano et al., 2020; Demanega et al., 2021; Giordano et al., 2021), dan pengendalian kelembapan dapat memperbaiki pengukuran pada kondisi tertentu (Chacón-Mateos et al., 2022). Oleh karena itu, validasi, kolokasi, kalibrasi lapangan, koreksi data, dan jaminan mutu diperlukan agar interpretasi tidak melampaui kemampuan alat (Lewis & Edwards, 2016; Morawska et al., 2018; Zheng et al., 2018; Zimmerman et al., 2018; Barkjohn et al., 2021; Venkatraman Jagatha et al., 2021).

Penelitian ini bertujuan mendeskripsikan distribusi multiparameter selama sepuluh hari, membandingkan pola antarhari dan blok waktu, mengevaluasi hubungan antarpolutan dan mikroklimat, serta mengidentifikasi keterbatasan mutu data. Penelitian dilakukan secara observasional eksploratif pada satu titik dengan pencatatan setiap 15 menit pukul 06.00-18.00 dan analisis statistik nonparametrik terhadap 490 observasi. Hasil menunjukkan perbedaan antarhari pada fraksi partikulat dan beberapa parameter lain, korelasi kuat antarkanal partikulat, serta hubungan negatif yang sangat kuat antara suhu dan kelembapan. Dengan demikian, pemantauan berhasil menunjukkan variabilitas temporal, tetapi belum dapat digunakan untuk menyimpulkan sumber pencemar atau kepatuhan terhadap baku mutu 24 jam.

Substansi penelitian ini adalah penerapan sistem IoT untuk menghasilkan data kualitas udara multiparameter beresolusi 15 menit sekaligus melakukan audit terhadap kelengkapan dan kewajaran data sensor. Data tersebut dapat membantu mengenali waktu terjadinya perubahan partikulat, polutan gas, suhu, dan kelembapan di sekitar TPS, serta menjadi dasar untuk merancang pemantauan lanjutan yang mencatat aktivitas sumber dan kondisi meteorologi. Dampak yang diharapkan adalah tersedianya informasi awal bagi pengelola fasilitas dan peneliti untuk memperbaiki strategi pemantauan, mengendalikan aktivitas berisiko, dan melindungi kualitas lingkungan di sekitar fasilitas penampungan sampah.

METODE

Lokasi dan desain penelitian

Penelitian dilaksanakan di salah satu tempat penampungan sementara (TPS) sampah di Indonesia yang selanjutnya disebut Lokasi X. Nama fasilitas dan wilayah administratif tidak dicantumkan untuk menjaga kerahasiaan lokasi, sedangkan karakteristik teknis yang relevan tetap dijelaskan untuk mendukung keterulangan penelitian. Penelitian ini menggunakan desain observasional eksploratif dengan pengukuran berulang pada satu titik pemantauan tetap. Mengacu pada konfigurasi penelitian pendahuluan di lokasi yang sama, sensor ditempatkan pada ketinggian sekitar 3 m dari permukaan tanah

dan pada jarak 7,5-9,5 m dari sumber pembakaran. Pengukuran dilakukan selama 10 hari pada pukul 06.00-18.00 WIB dengan interval 15 menit, sehingga diperoleh 49 observasi setiap hari.

Instrumen dan variabel

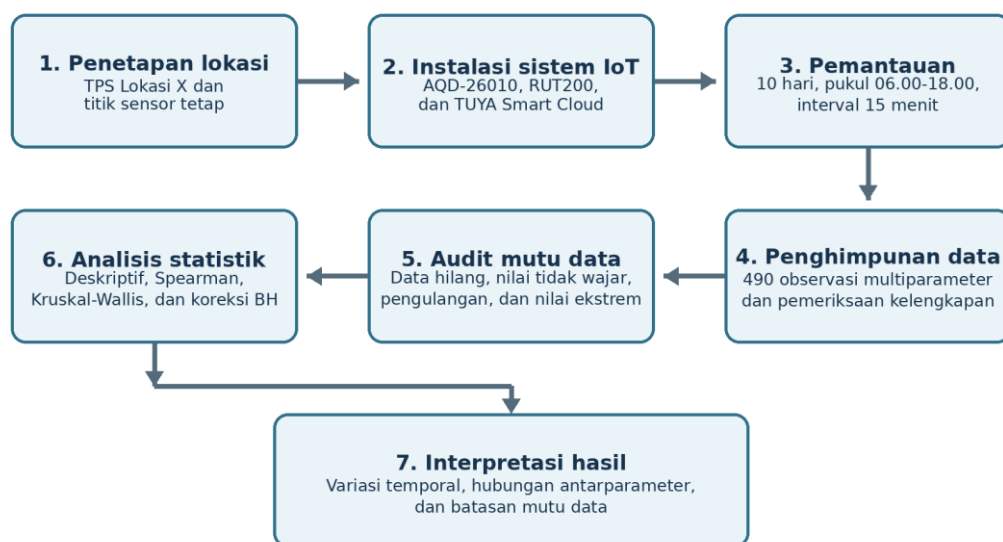
Sistem terdiri atas sensor kualitas udara AQD-26010, router RUT200, dan platform TUYA Smart Cloud. Variabel yang dianalisis adalah PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, CO, CO₂, HCHO, TVOC, suhu, kelembapan relatif, dan kondisi cuaca. Dataset memuat 490 observasi untuk seluruh polutan dan suhu. Kelembapan tersedia pada 343 observasi (70,0%) karena seluruh nilai pada hari ke-8-10 kosong. Kanal HCHO dan TVOC diperlakukan sebagai keluaran sensor yang masih memerlukan verifikasi karena kinerja perangkat komersial berbiaya rendah dapat berbeda antara kondisi terkendali dan penggunaan di lapangan (Goletto et al., 2020).

Pengolahan dan analisis data

Data mentah dipertahankan tanpa penghapusan otomatis. Audit mutu menandai data hilang, nilai CO₂ di bawah 250, vektor keluaran sensor yang berulang sedikitnya tiga kali berturut-turut, dan nilai ekstrem berdasarkan median absolute deviation. Pendekatan penandaan dipilih agar kejadian pencemaran yang mungkin nyata tidak terhapus sebelum diverifikasi, sejalan dengan prinsip pengendalian mutu data sensor berbiaya rendah (Giordano et al., 2021). Karena ekspor lokal menggunakan tanda titik secara ambigu, nilai bertitik pada PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, dan CO₂ dianalisis sementara dengan asumsi bahwa titik merupakan pemisah ribuan; sebagai contoh, 1.345 dibaca sebagai seribu tiga ratus empat puluh lima. Asumsi ini hanya diterapkan pada kolom analisis dan harus diverifikasi terhadap log asli alat sebelum publikasi.

Distribusi yang sangat menceng mendorong penggunaan median, kuartil pertama (Q1), kuartil ketiga (Q3), minimum, dan maksimum. Hubungan antarpasangan variabel diuji dengan korelasi peringkat Spearman. Perbedaan antarhari dan empat blok waktu (06.00-08.45; 09.00-11.45; 12.00-14.45; 15.00-18.00) dievaluasi menggunakan uji Kruskal-Wallis. Nilai p dalam setiap keluarga uji dikoreksi dengan metode Benjamini-Hochberg (Benjamini & Hochberg, 1995); p terkoreksi <0,05 dipandang bermakna secara eksploratif. Observasi 15-menit tidak diperlakukan sebagai replikasi independen untuk inferensi kausal.

Secara ringkas, tahapan penelitian mulai dari penetapan lokasi hingga interpretasi hasil disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Tahapan Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi parameter kualitas udara

Tabel 1. Statistik deskriptif parameter selama 10 hari

Parameter	n	Satuan*	Median (Q1-Q3)	Minimum-maksimum
PM2,5	490	alat	52 (32,2-127)	2-1345
PM1,0	490	alat	33 (21-85)	0,000-1006
PM10	490	alat	59 (38-146)	2-1580
CO	490	alat	0,000 (0,000-0,000)	0,000-79
CO ₂	490	alat	408 (405-414)	26-4290
HCHO	490	alat	0,003 (0,002-0,004)	0,002-0,6
TVOC	490	alat	0,008 (0,006-0,009)	0,002-2
Suhu	490	°C	30,3 (27,8-32,8)	24,3-36,5

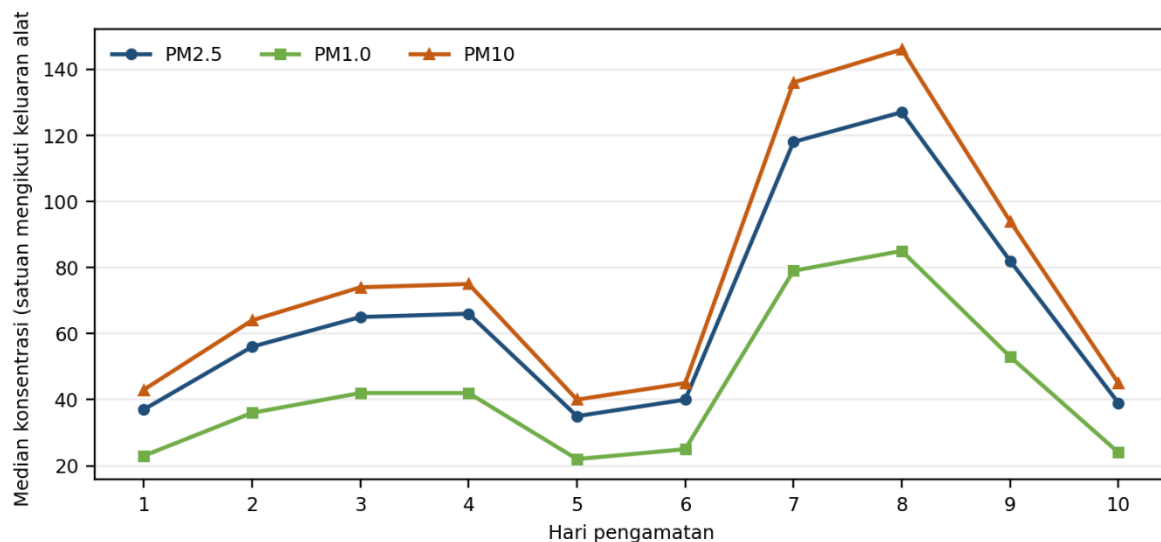
Sumber : Data Primer

Ketiga fraksi partikulat memperlihatkan rentang yang lebar dan nilai maksimum yang jauh di atas median (Tabel 1). PM2,5 memiliki median 52 dengan IQR 32,25-127, sedangkan PM10 memiliki median 59 dengan IQR 38-146. CO didominasi nilai nol (median dan Q1-Q3=0), tetapi mencapai maksimum 79; pola dengan banyak nilai nol ini membatasi keterwakilan median. CO₂ memiliki median 408 dan rentang 26-4.290, termasuk 36 nilai di bawah 250 yang ditandai dalam audit mutu. HCHO dan TVOC masing-masing memiliki median 0,003 dan 0,008, dengan nilai maksimum 0,6 dan 2 dalam satuan keluaran alat. Distribusi yang menceng dan munculnya episode berkonsentrasi tinggi dalam waktu singkat menyebabkan rerata berpotensi jauh melebihi median.

Tabel 2. Median partikulat menurut hari pengamatan

Hari	PM2,5	PM1,0	PM10
1	37	23	43
2	56	36	64
3	65	42	74
4	66	42	75
5	35	22	40
6	40	25	45
7	118	79	136
8	127	85	146
9	82	53	94
10	39	24	45

Sumber : Data Primer



Gambar 2. Perubahan median fraksi partikulat selama 10 hari

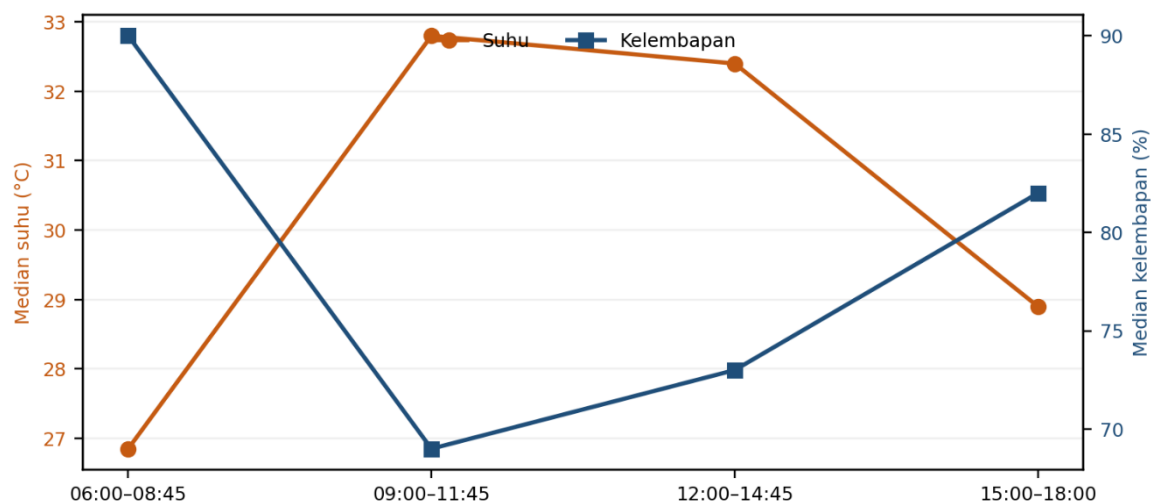
Median PM2,5, PM1,0, dan PM10 bergerak searah, dengan nilai tertinggi pada hari ke-8, masing-masing 127, 85, dan 146 (Tabel 2 dan Gambar 2). Uji Kruskal-Wallis menunjukkan perbedaan antarhari pada PM2,5 ($H=47,59$), PM1,0 ($H=53,03$), dan PM10 ($H=52,42$); seluruh p terkoreksi $<0,001$. Perbedaan tersebut menunjukkan heterogenitas temporal, tetapi belum mengidentifikasi sumber tertentu karena aktivitas pembakaran, bongkar-muat, lalu lintas, arah angin, dan curah hujan tidak dicatat secara kuantitatif. Keselarasan pola ketiga fraksi konsisten dengan kemampuan sensor optik dalam mendeteksi perubahan temporal, tetapi besarnya konsentrasi tetap memerlukan kalibrasi terhadap instrumen referensi (Zheng et al., 2018; Alfano et al., 2020).

Pola waktu dan mikroklimat

Tabel 3. Median parameter terpilih menurut blok waktu

Blok waktu	PM2,5	PM10	Suhu (°C)	Kelembapan (%)
06:00–08:45	48	54	26,9	90
09:00–11:45	55,5	63,5	32,8	69
12:00–14:45	50,5	57	32,4	73
15:00–18:00	58	66	28,9	82

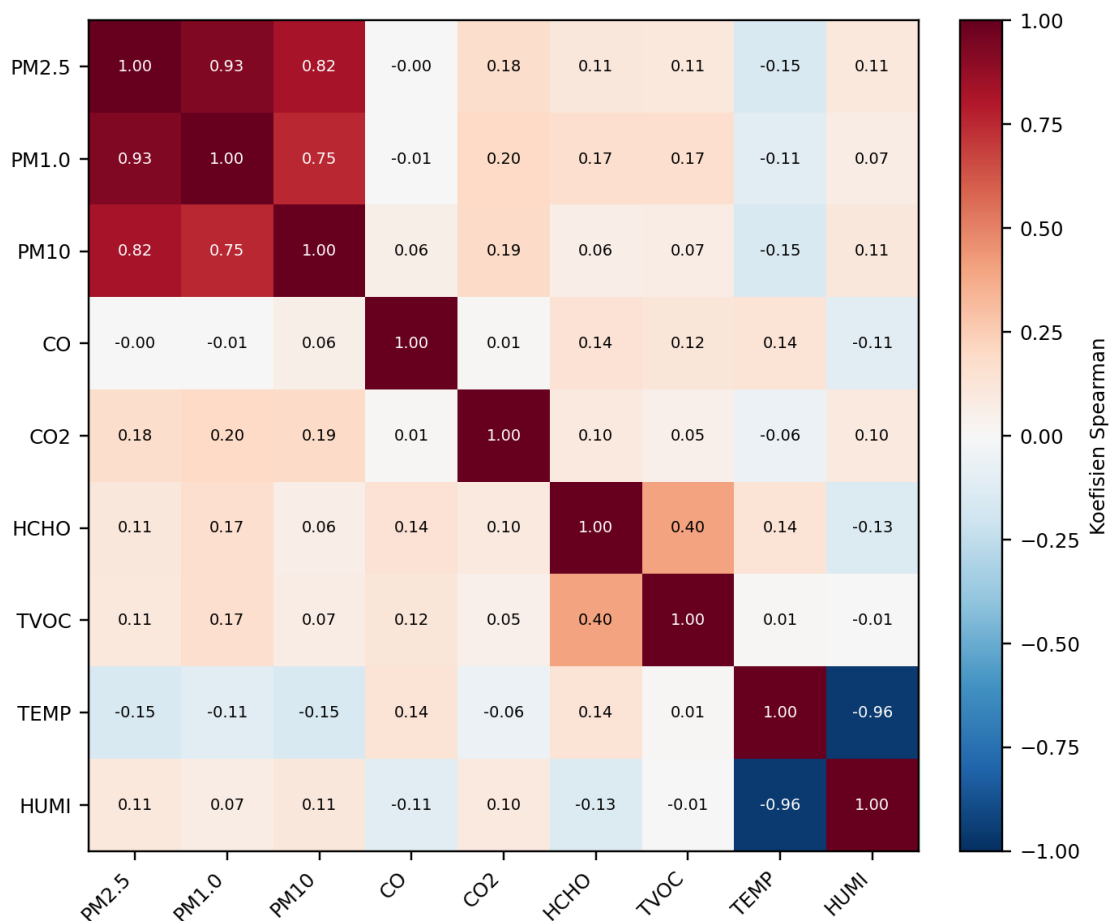
Sumber : Data Primer



Gambar 3. Median suhu dan kelembapan menurut blok waktu

Median suhu meningkat dari 26,85 °C pada pukul 06.00-08.45 menjadi 32,8 °C pada pukul 09.00-11.45, sementara median kelembapan turun dari 90% menjadi 69% (Tabel 3 dan Gambar 3). Pada sore hari, suhu menurun menjadi 28,9 °C dan kelembapan meningkat menjadi 82%. Perbedaan blok waktu terlihat pada suhu ($H=273,90$; p terkoreksi $<0,001$) dan kelembapan ($H=176,60$; p terkoreksi $<0,001$). Perbedaan ketiga fraksi partikulat antarblok tidak mencapai taraf 0,05 setelah koreksi (p terkoreksi $=0,086-0,109$). CO berbeda antarblok waktu ($H=11,76$; p terkoreksi $=0,019$) meskipun median setiap blok tetap nol, sehingga perbedaan distribusinya ditentukan oleh sejumlah kecil nilai nonnol. HCHO juga berbeda antarblok ($H=12,41$; p terkoreksi $=0,018$), sedangkan CO₂ dan TVOC tidak menunjukkan perbedaan bermakna. Tingginya kelembapan pada pagi hari perlu dipertimbangkan karena dapat meningkatkan bias sensor partikulat optik (Jayaratne et al., 2018; Giordano et al., 2021).

Hubungan antarparameter



Gambar 4. Matriks korelasi Spearman antarparameter

PM2,5 berkorelasi sangat kuat dengan PM1,0 ($\rho=0,927$) dan kuat dengan PM10 ($\rho=0,824$); PM1,0 dan PM10 juga berkorelasi kuat ($\rho=0,755$). Keselarasan ini dapat mencerminkan sumber atau proses emisi bersama, tetapi juga dapat berasal dari prinsip pengukuran dan algoritme internal alat yang saling terkait. Oleh karena itu, korelasi antarkanal tidak dapat digunakan sendiri untuk mengidentifikasi sumber.

HCHO dan TVOC berkorelasi sedang ($\rho=0,403$; p terkoreksi $<0,001$), yang menunjukkan variasi bersama senyawa organik tanpa membuktikan bahwa keduanya berasal dari sumber kausal yang sama. Temuan ini relevan dengan laporan bahwa fasilitas transfer sampah dapat melepaskan campuran VOC dengan pola yang dipengaruhi oleh jenis dan pengelolaan sampah (Liu & Zheng, 2020; Chai et al., 2022). Meski demikian, korelasi antarkanal juga dapat dipengaruhi oleh karakteristik respons perangkat HCHO dan TVOC berbiaya rendah (Goletto et al., 2020; Demanega et al., 2021). Suhu dan kelembapan menunjukkan korelasi negatif yang sangat kuat ($\rho=-0,955$; $n=343$; p terkoreksi $<0,001$), sesuai dengan siklus harian kedua parameter. Korelasi PM2,5 dengan suhu relatif lemah dan negatif ($\rho=-0,151$), sedangkan korelasinya dengan kelembapan tidak bermakna setelah koreksi ($\rho=0,106$; p terkoreksi $=0,075$).

Audit mutu data dan implikasi interpretasi

Tabel 4. Temuan audit mutu data

Isu	Dampak	Tindakan
Satuan belum tercantum	Menghambat interpretasi baku mutu dan risiko	Cocokkan dengan manual/log alat
Tanggal hari 8-10 sama	Urutan tanggal dan independensi hari tidak pasti	Verifikasi catatan lapangan
147 nilai kelembapan hilang	Analisis kelembapan hanya mewakili tujuh hari	Laporkan missingness; hindari imputasi tanpa dasar
36 nilai CO ₂ <250	Secara fisik perlu dicurigai sebagai gangguan/format	Periksa data mentah dan status sensor
32 vektor sensor berulang	Mungkin kondisi stabil atau sensor tertahan	Lakukan analisis sensitivitas
Nilai 1.xxx ambigu	Bisa dibaca desimal atau pemisah ribuan	Konfirmasi format ekspor sebelum submit

Audit mutu merupakan bagian penting dari kontribusi penelitian ini. Nilai ekstrem tidak langsung dihapus karena dapat merepresentasikan kejadian pencemaran yang nyata; namun, penafsirannya perlu dikonfirmasi dengan catatan aktivitas dan log diagnostik alat. Analisis sensitivitas dengan mengecualikan nilai CO₂ di bawah 250 dan vektor sensor berulang tetap menghasilkan median partikulat yang secara umum sebanding, sehingga pola utama tidak semata-mata terbentuk oleh kedua jenis tanda tersebut. Informasi cuaca hanya digunakan secara deskriptif karena setiap kategori muncul pada blok hari tertentu dan tidak disertai pengukuran angin atau hujan. Oleh sebab itu, pengaruh cuaca tidak dapat dipisahkan dari pengaruh hari, aktivitas, dan kondisi sensor.

Baku mutu PM_{2,5} dan PM₁₀ dalam PP Nomor 22 Tahun 2021 dinyatakan untuk waktu pengukuran tertentu, termasuk rerata 24 jam. Karena dataset hanya mencakup 12 jam setiap hari, nilai penelitian ini tidak boleh disebut rerata harian 24 jam dan tidak dibandingkan secara langsung sebagai bukti kepatuhan. Istilah yang digunakan adalah median atau rerata periode pengamatan 06.00-18.00.

Secara ringkas, uji Kruskal–Wallis setelah koreksi Benjamini–Hochberg menunjukkan perbedaan antarahari pada PM_{2,5}, PM_{1,0}, PM₁₀, HCHO, TVOC, suhu, dan kelembapan ($p\text{-BH} \leq 0,018$), sedangkan CO dan CO₂ tidak berbeda nyata antarahari. Menurut blok waktu, perbedaan nyata ditemukan pada CO, HCHO, suhu, dan kelembapan ($p\text{-BH} \leq 0,019$), tetapi tidak pada ketiga fraksi partikulat, CO₂, dan TVOC. Hasil ini bersifat eksploratif karena observasi 15-menit memiliki autokorelasi.

KESIMPULAN

Pemantauan berbasis IoT selama sepuluh hari berhasil menghasilkan 490 observasi multiparameter beresolusi 15 menit dan memperlihatkan bahwa kualitas udara serta iklim mikro di sekitar TPS berubah secara nyata menurut hari dan waktu. Kontribusi utama penelitian bukan hanya temuan korelasi dan perbedaan statistik, melainkan penerapan pemantauan terintegrasi yang disertai audit mutu data sehingga keterbatasan satuan, kelengkapan data, dan respons sensor dapat dikenali sebelum hasil digunakan untuk pengambilan keputusan. Pendekatan ini berpotensi menjadi sistem peringatan awal untuk mengenali episode pencemaran dan mendukung perencanaan pengendalian aktivitas di sekitar fasilitas penampungan sampah, tetapi belum dapat digunakan untuk menilai kepatuhan terhadap baku mutu 24 jam atau menentukan sumber pencemar secara kausal.

Agar manfaat tersebut dapat diterapkan secara lebih kuat, penelitian lanjutan perlu mengonfirmasi satuan setiap kanal, arti angka bertitik, tanggal pengamatan hari ke-8-10, faktor kalibrasi, dan penyebab kehilangan data kelembapan. Pemantauan juga perlu diperluas menjadi 24 jam, mencakup periode dan musim yang lebih panjang, menggunakan lebih dari satu titik serta kolokasi dengan instrumen referensi, dan dilengkapi pencatatan pembakaran, bongkar-muat, lalu lintas, angin, serta hujan. Analisis deret waktu atau mixed-effects disarankan untuk mengakomodasi autokorelasi pengamatan 15-menit dan menghasilkan inferensi yang lebih andal.

REFERENSI

Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Francia, G., Esposito, E., Formisano, F., Massera, E., Miglietta, M. L., & Polichetti, T. (2020). A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives. *Sensors*, 20(23), 6819. <https://doi.org/10.3390/s20236819>

- Barkjohn, K. K., Gantt, B., & Clements, A. L. (2021). Development and application of a United States-wide correction for PM_{2.5} data collected with the PurpleAir sensor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 4617-4637. <https://doi.org/10.5194/amt-14-4617-2021>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 57(1), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Chacón-Mateos, M., Laquai, B., Vogt, U., & Stubenrauch, C. (2022). Evaluation of a low-cost dryer for a low-cost optical particle counter. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 7395-7410. <https://doi.org/10.5194/amt-15-7395-2022>
- Chai, F., Li, P., Li, L., Qiu, Z., Han, Y., & Yang, K. (2022). Dispersion, olfactory effect, and health risks of VOCs and odors in a rural domestic waste transfer station. *Environmental Research*, 209, 112879. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112879>
- Crilley, L. R., Shaw, M., Pound, R., Kramer, L. J., Price, R., Young, S., Lewis, A. C., & Pope, F. D. (2018). Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 709-720. <https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018>
- Das, B., Bhawe, P. V., Sapkota, A., & Byanju, R. M. (2018). Estimating emissions from open burning of municipal solid waste in municipalities of Nepal. *Waste Management*, 79, 481-490. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.013>
- Demanega, I., Mujan, I., Singer, B. C., Anđelković, A. S., Babich, F., & Licina, D. (2021). Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187, 107415. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>
- 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*, 158, 105833. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105833>
- Goletto, V., Mialon, G., Faivre, T., Wang, Y., Lesieur, I., Petigny, N., & Vijapurapu, S. (2020). Formaldehyde and total VOC commercial low-cost monitoring devices: From an evaluation in controlled conditions to a use case application in a real building. *Chemosensors*, 8(1), 8. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8010008>
- Jayarathne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., & Morawska, L. (2018). The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4883-4890. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4883-2018>
- Johnston, S. J., Basford, P. J., Bulot, F. M. J., Apetroaie-Cristea, M., Easton, N. H. C., Davenport, C., Foster, G. L., Loxham, M., Morris, A. K. R., & Cox, S. J. (2019). City scale particulate matter monitoring using LoRaWAN based air quality IoT devices. *Sensors*, 19(1), 209. <https://doi.org/10.3390/s19010209>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Kusumaningrum, E., Hermawan, H. B., Sumarsono, & Hariyadi, D. (2023). Analisis kualitas udara menggunakan Internet of Things di pintu perlintasan kereta api. *Jurnal CoSciTech (Computer Science and Information Technology)*, 4(3), 574-579. <https://doi.org/10.37859/coscitech.v4i3.6219>
- Kusumaningrum, E., Sumarsono, Setiawan, C. B., & Hariyadi, D. (2024). Implementation of healthy building based on Internet of Things in Taman Kanak-kanak Al Barakah, RA Kreatif. *Jurnal CoSciTech (Computer Science and Information Technology)*, 5(3), 533-540. <https://doi.org/10.37859/coscitech.v5i3.8093>
- 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*, 20(13), 3617. <https://doi.org/10.3390/s20133617>
- Lewis, A., & Edwards, P. (2016). Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, 535, 29-31. <https://doi.org/10.1038/535029a>
- Liu, J., & Zheng, G. (2020). Emission of volatile organic compounds from a small-scale municipal solid waste transfer station: Ozone-formation potential and health risk assessment. *Waste Management*, 106, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.031>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, M. M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahl, D., & Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116, 286-299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>

- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Pemerintah Republik Indonesia.
- Ramadan, B. S., Rachman, I., Ikhlas, N., Kurniawan, S. B., Miftahadi, M. F., & Matsumoto, T. (2022). A comprehensive review of domestic-open waste burning: Recent trends, methodology comparison, and factors assessment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(5), 1633-1647. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01430-9>
- Raza, S. T., Hafeez, S., Ali, Z., Nasir, Z. A., Butt, M. M., Saleem, I., Wu, J., Chen, Z., & Xu, Y. (2021). An assessment of air quality within facilities of municipal solid waste management (MSWM) sites in Lahore, Pakistan. *Processes*, 9(9), 1604. <https://doi.org/10.3390/pr9091604>
- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J., & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369-11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- Venkatraman Jagatha, J., Klausnitzer, A., Chacón-Mateos, M., Laquai, B., Nieuwkoop, E., van der Mark, P., Vogt, U., & Schneider, C. (2021). Calibration method for particulate matter low-cost sensors used in ambient air quality monitoring and research. *Sensors*, 21(12), 3960. <https://doi.org/10.3390/s21123960>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Zheng, T., Bergin, M. H., Johnson, K. K., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Landis, M. S., Sutaria, R., & Carlson, D. E. (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4823-4846. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018>
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., Robinson, A. L., & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 291-313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>