

Estimasi Nilai Konsentrasi Rata-Rata Tahunan $PM_{2.5}$ dari Data Terbatas

Estimating $PM_{2.5}$ Annual Average Concentration Value from Limited Data

Drijeana^{1,*} dan Annisa Zahara²

¹Kelompok Keahlian Pengelolaan Udara dan Limbah, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung

²Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung
E-mail: drijeana@itb.ac.id

Diterima 15 Januari 2024, direvisi 21 Februari 2024, disetujui 2 Mei 2024

ABSTRAK

Estimasi Nilai Konsentrasi Rata-Rata Tahunan $PM_{2.5}$ dari Data Terbatas. Pemantauan kualitas udara merupakan komponen utama dalam upaya pengelolaan kualitas udara. Partikulat halus ($PM_{2.5}$) adalah parameter polutan udara yang penting karena efeknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Nilai konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ diperlukan untuk mengevaluasi dampak kesehatan maupun mengevaluasi kinerja Daerah dalam pengelolaan kualitas udara (a.l. IKU). Namun, keterbatasan sumberdaya dan teknis sering kali menyebabkan pemantauan kontinu sepanjang tahun tidak dapat dipenuhi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model estimasi rata-rata tahunan dari jumlah hari pemantauan yang terbatas berdasarkan karakteristik temporal konsentrasi $PM_{2.5}$. Prediksi dilakukan dengan mensimulasikan kondisi keterbatasan jumlah hari pemantauan, mengembangkan faktor koreksi berdasarkan rasio konsentrasi dan mengukur tingkat kesalahan rata-rata nilai estimasi terhadap nilai aktual. Hasil validasi menunjukkan jumlah hari minimum untuk menghasilkan konsentrasi rata-rata tahunan yang representatif adalah 24 hari dan perlu tersebar di setiap bulan sepanjang tahun. Nilai konsentrasi dari metode ini terbukti setara dengan konsentrasi rata-rata tahunan dari jumlah hari sampling per 6 hari berdasarkan metode WMO/GAW yang menjadi referensi internasional untuk pengukuran konsentrasi partikulat.

Kata kunci: Faktor koreksi konsentrasi, indeks kualitas udara, model statistik, partikulat halus, variasi temporal

ABSTRACT

Estimating $PM_{2.5}$ Annual Average Concentration Value from Limited Data. Air quality monitoring is a main component in air quality management. Fine particulates ($PM_{2.5}$) are important air pollutants due to their effects on the environment and human health. The annual average concentration value of $PM_{2.5}$ is needed to evaluate health impacts and local/regional performance in air quality management. However, limited resources and techniques often mean that yearly monitoring cannot be fulfilled. This study aims to develop an annual average estimation model from a limited number of monitoring days based on the temporal characteristics of $PM_{2.5}$ concentrations. Predictions are carried out by simulating conditions of limited number of $PM_{2.5}$ measurement days, developing correction factors based on concentration ratios and measuring the average error of estimated values against actual values. Validation results show the minimum number of days to predict the representative annual average concentration is 24 days, spread across the year. The results of the annual average concentration from this method are equivalent to the annual average concentration from the minimum number of sampling days of every 6 days based on the WMO/GAW method which is an international reference for measuring particulate concentrations.

Keywords: Concentration correction factor, air quality index, statistical model, fine particulates, temporal variation

1. Pendahuluan

Partikulat halus berdiameter $\leq 2,5$ mikrometer ($PM_{2,5}$) menjadi perhatian karena efek negatifnya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Xing dkk., 2016). Ukuran partikel yang sangat kecil yaitu sekitar 3% dari ketebalan rambut manusia memungkinkan $PM_{2,5}$ menembus ke dalam paru-paru, mengendap di bronkiolus terminalis dan alveoli, bahkan masuk ke sistem peredaran darah (L. Yang dkk., 2020). Paparan jangka panjang $PM_{2,5}$ dapat menyebabkan peningkatan mortalitas dan morbiditas dari penyakit kardiovaskular, pernapasan, kanker paru-paru (Pun dkk., 2017) serta kelahiran tidak wajar, diabetes tipe dua, dan tekanan darah tinggi (Cohen dkk., 2017). Debu $PM_{2,5}$ sebagian besar diemisikan dari kegiatan transportasi dan industri (Lestari dkk., 2020). Secara global, 25% dari $PM_{2,5}$ di perkotaan disumbangkan oleh kendaraan bermotor (Karagulian dkk., 2015).

Selain sumber emisi, faktor yang mempengaruhi konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara ambien yaitu kondisi cuaca. Umumnya variasi konsentrasi $PM_{2,5}$ dikaitkan dengan faktor meteorologi seperti temperatur, kelembaban relatif, kecepatan dan arah angin, serta curah hujan. Peningkatan curah hujan ditemukan berkaitan erat dengan penurunan konsentrasi $PM_{2,5}$ (Gusnita dan Cholianawati, 2019; Istiana dkk., 2023; Kusumaningtyas dkk., 2021).

Pemantauan konsentrasi pencemar di udara ambien merupakan komponen utama dalam pengelolaan kualitas udara. Konsentrasi pencemar yang terukur dapat menggambarkan eksposur atau kadar pencemar yang dihirup oleh manusia. Konsentrasi rata-rata selama 24 jam umumnya digunakan untuk mengevaluasi dampak akut sedangkan konsentrasi rata-rata $PM_{2,5}$ selama ≥ 1 tahun digunakan untuk memprediksi pajanan jangka panjang atau dampak kronis (Yang dkk., 2022).

Selain digunakan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang/kronis, di Indonesia konsentrasi rata-rata tahunan juga digunakan untuk menentukan Indeks Kualitas Udara (IKU). Dalam pengelolaan kualitas udara, IKU adalah indikator keberhasilan Pemerintah Daerah dalam mencapai tujuan penurunan tingkat pencemaran udara melalui pengendalian emisi (KLHK, 2020). Saat ini nilai IKU di suatu wilayah dalam skala Nasional/Provinsi/Kota/Kabupaten merupakan angka komposit konsentrasi rata-rata tahunan NO_2 dan SO_2 (PermenLHK No. 27, 2021). Untuk memperoleh nilai IKU yang lebih komprehensif, $PM_{2,5}$ sebagai parameter sensitif yang berperan dalam menentukan kriteria kualitas udara diusulkan untuk ditambahkan dalam penyusunan IKU (Rita dkk., 2016).

Bila $PM_{2,5}$ akan disertakan dalam IKU, nilai konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2,5}$ layaknya diperoleh dari pengukuran kontinyu otomatis menggunakan metode ekuivalen¹. Karena keterbatasan sumber daya, peralatan pemantau pada kategori ini tidak banyak dimiliki Pemerintah Daerah. Namun, banyak Laboratorium Lingkungan di Daerah telah memiliki peralatan pemantauan $PM_{2,5}$ dengan metode referensi, yang diakui merupakan metode terbaik dengan prinsip gravimetrik. Sampling debu dilakukan secara manual aktif menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS).

Metode referensi ini telah diketahui tingkat akurasinya secara internasional untuk pengujian konsentrasi $PM_{2,5}$ dan di Indonesia mengacu pada SNI 7119 -3: 2017. Dengan telah adanya SNI tersebut laboratorium terakreditasi disyaratkan untuk mengkalibrasi alat ukur tersebut secara

1 Pengukuran partikulat tidak berbasis gravimetrik namun telah teruji dapat menghasilkan data yang setara akurasi dan presisinya dengan metode gravimetrik yang merupakan metode referensi sebagai *gold standard* pengukuran partikulat di dunia internasional.

terjadwal, sehingga dengan pelaksanaan sampling yang sesuai prosedur pada laboratorium terakreditasi kualitas data yang dihasilkan akan lebih terjamin. Karena ketersediaannya yang cukup luas di daerah, pengukuran dengan HVAS yang dilaksanakan sesuai dengan pedoman SNI dapat menghasilkan data yang representatif untuk perhitungan IKU maupun studi dampak kesehatan.

Pemantauan dengan HVAS juga tercantum dalam regulasi PermenLH No.12 tahun 2010 sebagai salah satu metode pengukuran partikulat untuk mengevaluasi udara perkotaan. Di dalam Permen LH tersebut nilai rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ disyaratkan menggunakan metode kontinyu otomatis (metode ekivalen) atau manual aktif dengan HVAS berupa pemantauan harian selama 24 jam secara terus menerus sebanyak minimal 104 hari. Untuk menghasilkan data rata-rata tahunan yang sesuai dengan peraturan tersebut, akan dibutuhkan sumber daya manusia dan waktu yang lebih besar. Jumlah hari pemantauan sebanyak ini kemungkinan akan sulit untuk dilakukan di Daerah.

Kendala tersebut di atas terutama di negara berkembang juga disadari oleh *World Meteorological Organization/Global Atmospheric Watch (WMO/GAW)* (GAW Report No.227, 2016) yang memiliki jaringan pemantauan komposisi aerosol berbasis gravimetrik di berbagai lokasi di belahan dunia. Meskipun secara ideal sampling aerosol diharapkan dilakukan setiap hari, diberikan alternatif untuk sampling setiap 6 hari sehingga dalam setahun akan diperoleh 60 - 61 sampel yang dianggap dapat mewakili rata-rata tahunan.

Frekuensi sampling WMO/GAW ini lebih longgar dibandingkan dengan PermenLH No.12 tahun 2010 yang mensyaratkan minimal 2 data harian per minggu sepanjang 12 bulan. Panduan internasional maupun nasional dengan demikian mensyaratkan jumlah data

harian antara 60 - 104 untuk menghasilkan konsentrasi rata-rata tahunan. Namun, jumlah data yang lebih sedikit dari persyaratan WMO/GAW atau PermenLH No.12 tahun 2010 juga pernah dipublikasikan beberapa peneliti sebagai nilai rata-rata tahunan. Hopke dkk., 2008 menggunakan 40 - 93 data harian untuk menghitung konsentrasi $PM_{2.5}$ tahunan di daerah Bandung dan Lembang, sedangkan studi lain di Jakarta menggunakan 24 - 38 data rata-rata harian per tahun pada periode 2010 s.d 2019 (Santoso dkk., 2020).

Meskipun studi-studi di atas belum memenuhi persyaratan Permen LH No.12 tahun 2010 atau WMO/GAW dari segi jumlah data, namun terdapat persamaan yang penting, yaitu pada hari pemantauan yang tersebar di sepanjang tahun. Konsentrasi $PM_{2.5}$ yang berfluktuasi memiliki pola musiman, maka ketika pengukuran hanya dilakukan pada satu musim, diperkirakan konsentrasi rata-rata yang representatif perlu mencakup seluruh variasi konsentrasi yang terkait musim tersebut. Oleh karena itu, pengembangan model prediksi konsentrasi $PM_{2.5}$ perlu mempertimbangkan karakteristik temporal musiman agar prediksi konsentrasi yang dihasilkan menjadi lebih akurat.

Mengingat adanya kebutuhan untuk memperoleh data rata-rata tahunan dan keterbatasan sumber daya dan serta potensi yang ada di Daerah, artikel ini bertujuan untuk 1) menganalisis karakteristik musiman pada siklus temporal tahunan konsentrasi $PM_{2.5}$; 2) membangun dan mengevaluasi kinerja model prediksi berdasarkan karakteristik temporal; 3) memperoleh jumlah hari minimum yang dapat merepresentasikan konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$.

2. Metodologi

2.1 Deskripsi Lokasi Stasiun Pemantau

Penelitian dilakukan menggunakan data pemantauan dari pengukuran kontinyu otomatis dengan metode ekivalen di Provinsi DKI Jakarta yang berasal dari

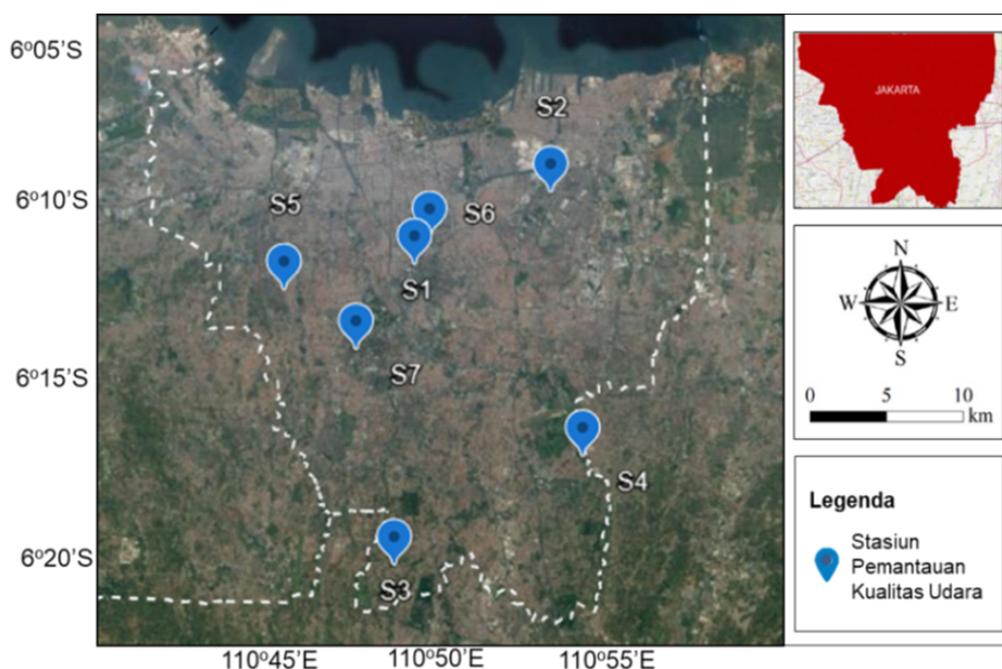
beberapa titik Stasiun Pemantau Kualitas Udara Ambien (SPKUA). Data konsentrasi $PM_{2.5}$ tersebut diperoleh dari DLH Provinsi DKI Jakarta yang mengoperasikan 5 stasiun pemantauan. Hasil pemantauan SPKUA terhubung langsung dengan sistem pusat data milik Laboratorium Lingkungan Hidup Daerah (LLHD) dan secara *real-time* yang menghasilkan data akhir konsentrasi rata-rata 30 menit. Dua stasiun jaringan AirNow milik Kedutaan Besar Amerika Serikat di Jakarta memberikan tambahan lokasi pemantauan. Data AirNow diperoleh dari laman <https://www.airnow.gov/>. Secara total analisis dilakukan terhadap data dari 7 stasiun pada rentang waktu 2019 – 2023 (\pm 5 tahun).

Lokasi stasiun pemantauan SPKUA DLH Provinsi DKI Jakarta terdistribusi di masing-masing kota administrasi (Gambar 1). Dengan tambahan stasiun AirNow, di Jakarta Pusat terdapat 2 SPKUA yaitu yang mewakili lokasi pemantauan tepi jalan di Bundaran HI (S1) dan stasiun AirNow di daerah Patung Tani (S6) yang

merepresentasikan pusat kota. Di Jakarta Utara terdapat SPKUA Kelapa Gading (S2) yang merupakan daerah yang paling dekat dengan pesisir. Di Jakarta Selatan terdapat SPKUA Jagakarsa (S3) dan stasiun AirNow Hang Jebat (S7). Di Jakarta Timur terdapat SPKUA Lubang Buaya (S4) dan di Jakarta Barat SPKUA Kebun Jeruk (S5). Stasiun-stasiun ini lebih dekat dengan pemukiman dan perbatasan Jakarta. Lokasi stasiun pemantauan $PM_{2.5}$ dapat dilihat pada Gambar 1 sedangkan periode data pemantauan dan jumlah data yang dikumpulkan dari masing-masing stasiun pemantauan dapat dilihat pada Tabel 1.

2.2 Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan *Microsoft Excel* dan *Minitab 21.4.1.* dengan lisensi melalui domain @mahasiswa.itb.ac.id. Jumlah data yang diolah per stasiun berkisar antara 24.000–41.000 data sehingga jumlah data total adalah sebanyak 221454 data konsentrasi harian. Data per stasiun dapat dilihat pada Tabel 1 kolom 4.



Gambar 1. Sebaran lokasi stasiun pemantauan

Tabel 1. Daftar lokasi stasiun pemantauan

Kode Stasiun	Lokasi	Periode Pengumpulan Data	Jumlah Data
S1	Bundaran HI, Jakarta Pusat	01 Jan 2019 s.d 02 Nov 2023	33008
S2	Kelapa Gading, Jakarta Utara	01 Jan 2019 s.d 02 Nov 2023	33303
S3	Jagakarsa, Jakarta Selatan	01 Jan 2019 s.d 02 Nov 2023	34027
S4	Lubang Buaya, Jakarta Timur	01 Jan 2020 s.d 02 Nov 2023	24345
S5	Kebon Jeruk, Jakarta Barat	01 Jan 2020 s.d 02 Nov 2023	17878
S6	Patung Tani, Jakarta Pusat	01 Jan 2019 s.d 02 Nov 2023	40771
S7	Hang Jebat, Jakarta Selatan	01 Jan 2019 s.d 02 Nov 2023	38122

Pengolahan data terbagi ke dalam tahap 1) pra-pemrosesan; 2) penentuan jumlah data cuplikan; 3) metode pencuplikan; 4) pengujian nilai rata-rata tahunan; 5) estimasi konsentrasi rata-rata tahunan dengan model regresi; dan 6) validasi kinerja model regresi. Metode pengolahan data secara rinci dijelaskan di bawah ini.

1) Tahap pra-pemrosesan

Pada tahap ini dilakukan pembersihan data (data cleaning) berupa penyaringan terhadap data bernilai 0, data hilang, dan data tidak valid. Kemudian dilakukan analisis statistik deskriptif dan uji normalitas data. Setelah pembersihan data dan uji normalitas data dilakukan penyiapan simulasi.

2) Penentuan jumlah data cuplikan

Berdasarkan analisis normalitas data, untuk melihat pengaruh data terbatas pada perhitungan rata-rata tahunan, dilakukan pencuplikan data harian pada data tahunan dengan sejumlah variasi antara pengukuran 1 – 8 kali per bulan dengan hari yang diambil secara acak menggunakan fungsi pencuplikan acak. Pencuplikan acak untuk setiap variasi tersebut menghasilkan 12 – 104 data per tahun. Penggunaan fungsi acak bertujuan untuk mensimulasi kondisi di Daerah yang kemungkinan mengalami kesulitan untuk melakukan pemantauan pada waktu yang sama setiap bulannya. Penentuan jumlah data cuplikan minimum 12 kali didasarkan pada asumsi potensi kemampuan Daerah untuk mengambil

hanya 1 kali dalam sebulan, sedangkan 104 data per tahun mengacu pada kriteria di dalam PermenLH No.12 Tahun 2010. Sebagai tambahan, metode pencuplikan untuk jumlah data yang sama namun pada hari yang berurutan dilakukan berdasarkan tiga skenario yaitu mewakili musim hujan saja, mewakili musim kemarau saja, dan mewakili kedua musim dengan jumlah data yang sama setiap musimnya. Skenario ini digunakan untuk menguji pengaruh musim terhadap konsentrasi rata-rata tahunan yang diestimasi berdasarkan cuplikan yang tidak tersebar di setiap bulan namun dilakukan secara menerus di musim-musim tertentu.

3) Metode pencuplikan data

Untuk setiap skenario penggunaan data 12–104 hari dilakukan dengan cara mengambil data dengan variasi sebagai berikut:

- dua data harian per minggu untuk skenario 104 data/tahun dengan menyusun rentang data selama 1 minggu kemudian secara acak diambil 2 hari pada rentang tersebut menggunakan fungsi *randbetween* pada *microsoft excel*;
- satu data harian per minggu (52 data/tahun) diambil dengan perlakuan yang sama dengan pencuplikan 104 hari namun jumlah pengambilan yang lebih kecil yaitu 1 data acak per minggu;
- dua data harian per bulan (24 data/tahun) diambil dengan membuat rentang sesuai dengan jumlah hari pemantauan untuk 24

hari per tahun yaitu 14 hari, dari rentang diambil secara acak dengan fungsi *randbetween*;

- satu data harian per bulan (12 data/tahun) yang tersebar sepanjang 12 bulan diambil menggunakan fungsi *randbetween* pada rentang hari pertama hingga hari terakhir pada setiap bulannya; dan
- 104, 52, 24 dan 12 data kontinu per tahun mewakili musim kemarau, mewakili musim hujan, atau mewakili kedua musim dengan banyak data yang sama per musim.

Untuk data yang tersebar di 12 bulan, didapatkan dataset dengan skenario 2 kali seminggu (104 data per tahun), 1 kali seminggu (52 data per tahun), 2 kali sebulan (24 data per tahun), dan 1 kali sebulan (12 data per tahun) masing-masing sebanyak 19 dataset. Hal ini dilakukan pada semua lokasi dan tahun sebagai data akumulatif yang mewakili Jakarta. Seluruh pencuplikan dilakukan setelah hari dengan kategori akhir pekan dihilangkan sehingga simulasi pemantauan hanya dilakukan di hari kerja, sementara untuk pemantauan secara kontinu tidak mempertimbangkan kategori hari.

4) Pengujian nilai rata-rata tahunan

Tahap pengujian nilai rata-rata dilakukan dengan menghitung rata-rata konsentrasi 365 hari untuk mendapatkan acuan nilai rata-rata yang sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Untuk menganalisis perbedaan nilai konsentrasi rata-rata tahunan dari berbagai skenario dengan nilai konsentrasi rata-rata tahunan yang sebenarnya dilakukan uji-t. Kemudian untuk mendapatkan faktor koreksi tahunan pada setiap variasi pengukuran kurang dari 365 hari terhadap konsentrasi rata-rata total 365 hari dilakukan perhitungan rasio konsentrasi.

5) Estimasi konsentrasi rata-rata tahunan dengan model regresi

Konsentrasi rata-rata tahunan diestimasi dengan model regresi non linear

yang dinyatakan dalam fungsi polinomial pada Persamaan (1).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \dots + \beta_k X^k + \varepsilon \dots(1)$$

Dimana Y adalah rasio konsentrasi dari jumlah hari T < 365 terhadap konsentrasi rata-rata 365 hari (C/C_{365}); X adalah rasio jumlah hari cuplikan terhadap 365 hari (T/T_{365}) dan β_i , $i = 0, 1, 2, 3, \dots, k$ merupakan konstanta *intercept* dan *slope* pada persamaan regresi. Model ini hanya memiliki satu peubah dasar atau variabel prediktor yaitu T/T365. Model dengan derajat polinom dipilih agar model dapat menjelaskan variasi data tanpa *overfitting* yang mengakibatkan kemampuan model melakukan generalisasi pada data baru berkurang (Montgomery dkk., 2012).

6) Validasi kinerja model prediksi

Memvalidasi kinerja model prediksi dilakukan dengan menghitung *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Mean Accuracy* (MA) menggunakan persamaan.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^m |x_i - \hat{x}_i|}{m} \dots\dots\dots(2)$$

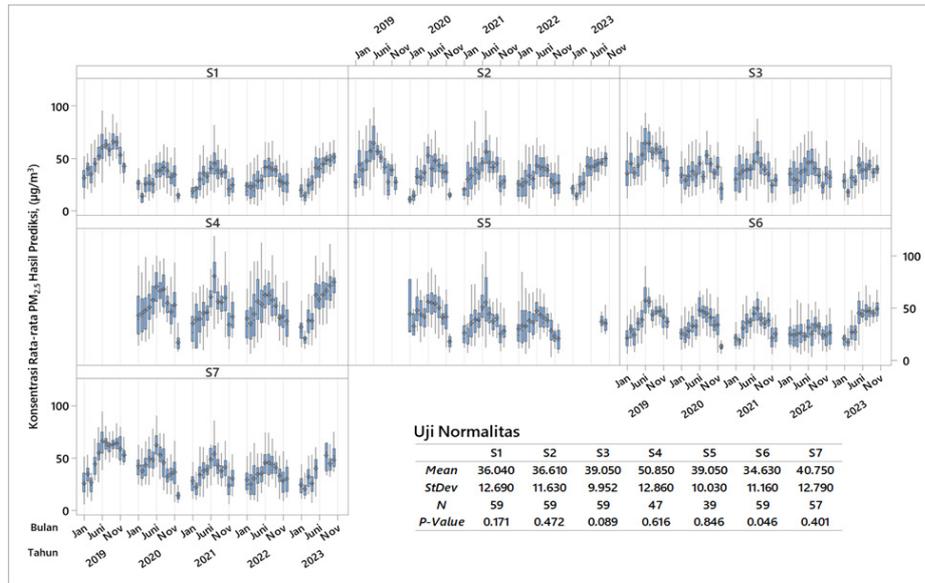
$$MA = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|x_i - \hat{x}_i|}{\hat{x}_i} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana m merupakan jumlah data yang diobservasi, x_i adalah konsentrasi hasil prediksi dan \hat{x}_i merupakan konsentrasi hasil pengukuran dengan data lengkap. Durasi dan jumlah hari minimum yang digunakan untuk validasi model dipilih berdasarkan hasil ujicoba estimasi konsentrasi rata-rata tahunan pada Tahap 4.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Profil Temporal Data Tahunan PM_{2.5}

Gambar 2 memperlihatkan profil konsentrasi sepanjang tahun (Januari – Desember) di setiap stasiun pemantau S1 hingga S7 berdasarkan data selama 2019-



Gambar 2. Pola konsentrasi rata-rata $PM_{2.5}$ di stasiun S1 – S7

2023. Terlihat di semua stasiun profil konsentrasi mengikuti pola distribusi normal. Nilai p (p -value) dari hasil uji normalitas ($\alpha=0.01$) menunjukkan tidak ditemukan cukup bukti untuk menolak hipotesis nol bahwa data berasal dari distribusi normal. Dengan bukti bahwa data membentuk kurva distribusi normal, untuk menganalisis variasi konsentrasi bulanan yang merepresentasikan karakteristik temporal yang umum di Jakarta, data dari semua stasiun dapat digabungkan untuk memperoleh gambaran kondisi rata-ratanya.

Konsentrasi umumnya memuncak di pertengahan tahun ketika musim kemarau dan cenderung lebih rendah di awal dan akhir tahun saat musim hujan. Konsentrasi yang mendekati nilai rata-rata umumnya terjadi menjelang memasuki musim kemarau yang meningkat di pertengahan tahun kemudian menurun kembali ketika memasuki musim hujan.

Profil konsentrasi $PM_{2.5}$ sepanjang tahun yang serupa di semua stasiun menjelaskan lebih kuatnya pengaruh musim yang merupakan faktor alami terhadap pola temporal konsentrasi $PM_{2.5}$. Sedangkan perbedaan kekuatan emisi lokal

di sekitar stasiun berpengaruh terhadap nilai konsentrasi di masing-masing stasiun. Hal ini menegaskan bahwa untuk memperoleh nilai konsentrasi rata-rata yang representatif sampling perlu dilakukan pada waktu yang tersebar sepanjang tahun.

Untuk mengetahui kelayakan pemantauan jumlah hari <365 hari dalam menghasilkan estimasi konsentrasi rata-rata tahunan digunakan uji-t. Uji-t dilakukan melalui perbandingan nilai rata-rata tahunan selama 365 hari dengan nilai rata-rata dari data cuplikan pada 12 – 104 hari. Hasil uji t pada Tabel 2 menunjukkan bila data tersebar merata di 12 bulan, nilai rata-rata konsentrasi serta rentang kepercayaan (CI) 95% dari jumlah hari terbatas (antara 12–104 hari) tidak berbeda signifikan dengan nilai yang diperoleh dari data selama 1 tahun penuh.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah menemukan jumlah hari sampling minimum yang dapat menghasilkan nilai rata-rata tahunan yang representatif. Dengan tujuan yang sama, berdasarkan metode WMO/GAW yang juga menggunakan metode gravimetrik, sampling disarankan dilakukan setiap 6 hari sehingga menghasilkan 60-61 hari sepanjang tahun yang dianggap

representatif untuk menghasilkan rata-rata tahunan.

Berdasarkan tujuan untuk mendapatkan jumlah hari sampling yang paling minimal namun representatif, Analisis *One-way Variance* (ANOVA) digunakan untuk membandingkan nilai rata-rata tahunan yang dihasilkan dari dua jumlah hari terkecil (12 dan 24 hari) dengan cuplikan data berdasarkan metode GAW/WMO. Uji ANOVA menyatakan tidak terdapat perbedaan signifikan antara tiga kelompok yang diuji (12, 24 dan 60 hari), ditunjukkan dari nilai $p = 0,545$ pada $\alpha=0,05$, $n=19$. Sehingga dapat disimpulkan sampling sebanyak 12 atau 24 kali yang dilakukan sepanjang tahun tidak memberikan perbedaan konsentrasi rata-rata tahunan yang signifikan, atau dengan kata lain pengukuran 12–24 hari dapat menghasilkan nilai rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ yang merepresentasikan

nilai rata-rata tahunan. Namun pembahasan selanjutnya akan menjelaskan faktor penting lain yang terkait dengan probabilitas nilai konsentrasi rata-rata berdasarkan rentang konsentrasi pada rentang kepercayaan.

Hal penting yang perlu diperhatikan adalah kuatnya pengaruh musim pada nilai konsentrasi rata-rata $PM_{2,5}$ yang berimplikasi pada perlunya sampling dilakukan pada tiap musim. Hal ini terlihat dari hasil pengujian antara cuplikan data yang terbagi dua pada masing-masing musim. Pada skenario ini, dari jumlah hari sampling 12–104 hari dilakukan 50% pada musim hujan dan 50% sisa harinya pada musim kemarau. Ditemukan nilai konsentrasi rata-rata tahunan yang berbeda dengan nilai rata-rata dari data yang tersebar di setiap bulan. (lihat 4 baris terakhir di Tabel 2). Bila sampling hanya dilakukan pada salah satu musim saja, baik nilai konsentrasi rata-rata maupun

Tabel. 2 Hasil pengujian simulasi pencuplikan data

Dataset	Simulasi Pencuplikan Data	Jumlah Data	Mean ($\mu g/m^3$)	StDev	95% CI for Mean	
					Lower Limit ($\mu g/m^3$)	Upper Limit ($\mu g/m^3$)
--	Sepanjang tahun penuh	140713	40.961	7.250	37.467	44.455
104	2 data harian per minggu	47424	39.943	7.151	36.496	43.389
52	1 data harian per minggu	23712	40.706	6.823	37.418	43.995
24	2 data harian per bulan	10944	40.352	6.675	37.135	43.569
12	1 data harian per bulan	5472	40.990	8.262	37.008	44.972
104	Kontinu selama musim hujan	47424	29.167	7.742	25.566	32.769
52	Kontinu selama musim hujan	23712	30.060	8.601	25.914	34.205
24	Kontinu selama musim hujan	10944	29.055	8.837	24.796	33.315
12	Kontinu selama musim hujan	5472	26.278	8.149	22.351	30.206
104	Kontinu selama musim kemarau	47424	51.671	8.631	47.511	55.832
52	Kontinu selama musim kemarau	23712	53.998	9.539	49.400	58.595
24	Kontinu selama musim kemarau	10944	51.198	9.232	46.749	55.648
12	Kontinu selama musim kemarau	5472	54.932	12.544	48.886	60.978
104	52 data permusim	47424	43.277	8.454	39.202	47.352
52	26 data per musim	23712	41.251	8.551	37.129	45.372
24	12 data per musim	10944	44.203	9.642	39.556	48.850
12	6 data per musim	5472	42.677	12.946	36.427	48.907

rentang CI 95% akan berbeda signifikan dengan nilai konsentrasi rata-rata dan rentang yang sebenarnya.

Dua kelompok percobaan di atas, secara singkat dapat dibagi menjadi kelompok 1) Jumlah data 12–104 hari tersebar merata sepanjang tahun; dan kelompok 2) Jumlah data sama dengan kelompok 1 namun data terkumpul di musim-musim tertentu. Dapat disimpulkan bahwa penyebaran data di sepanjang tahun (kelompok 1) lebih menjamin tercakupnya semua variasi konsentrasi untuk menghasilkan rata-rata tahunan yang cukup akurat. Sebaliknya pemantauan yang mengabaikan variasi bulanan (hanya dilakukan pada satu musim atau dua musim dalam waktu yang berdekatan) akan cenderung menghasilkan nilai rata-rata yang kurang akurat. Pembahasan lebih rinci terdapat pada analisis lanjut dari estimasi konsentrasi rata-rata tahunan.

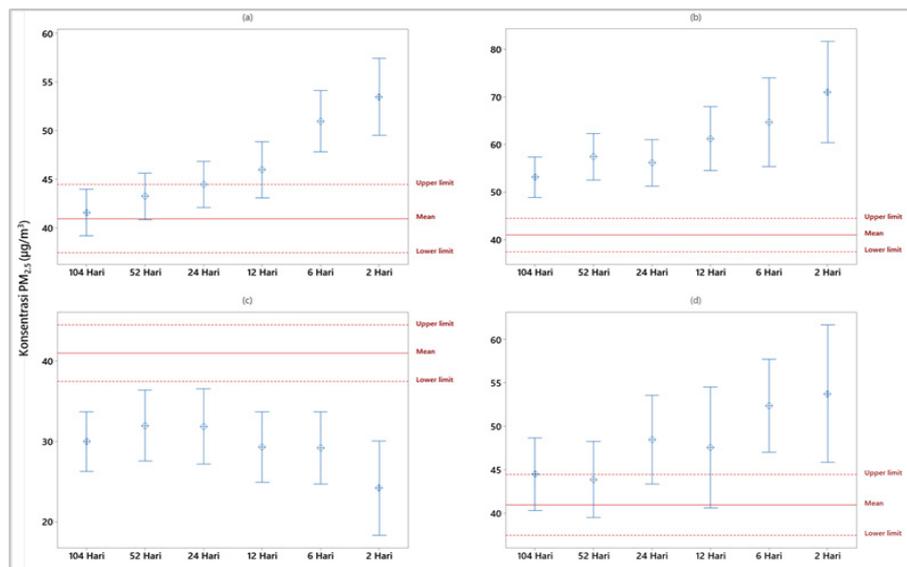
3.2 Rentang Estimasi Nilai Rata-rata Tahunan

Konsentrasi rata-rata tahunan yang dihasilkan dari data terbatas pada hakikatnya adalah estimasi, sehingga akan mempunyai rentang nilai kepercayaan. Tingkat kepercayaan untuk nilai rata-rata konsentrasi tahunan pada $\alpha=0,05$ akan menghasilkan rentang kepercayaan 95%. Nilai rata-rata yang dihasilkan dari data terbatas perlu merepresentasikan konsentrasi rata-rata yang sebenarnya, atau setidaknya berada pada rentang kepercayaan konsentrasi tahunan dari data pemantauan 1 tahun penuh.

Gambar 3a-d memvisualisasi perbedaan rentang nilai estimasi rata-rata tahunan dari data terbatas (garis vertikal biru) yang dibandingkan dengan nilai rata-rata tahunan aktual (garis horizontal merah), sedangkan titik biru merupakan prediksi rata-rata tahunan berdasarkan 2–104 hari pemantauan pada data 2019–2021 sebagai data yang digunakan untuk membangun model estimasi. Dapat dilihat pada Gambar 3a besar rentang kepercayaannya untuk

setiap skenario data sebanyak 12 – 104 hari tersebar sepanjang tahun tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, berdasarkan interval plot yang disertai dengan batas atas dan batas bawah pada rentang kepercayaan 95%. Simulasi yang dilakukan dengan pencuplikan data >24 hari yang tersebar di 12 bulan berada pada rentang konsentrasi rata-rata tahunan aktual. Pada jumlah hari pemantauan 24 hari, nilai rata-ratanya berada tepat pada garis batas atas rentang aktual, namun batas atas rentang 24 hari berada di atas garis merah teratas, mengindikasikan adanya potensi estimasi nilai rata-rata yang lebih besar dari aktual (*overestimate*). Semakin sedikit jumlah hari pemantauan, semakin tidak akurat prediksi nilai rata-rata tahunan yang dihasilkan, terlihat dari estimasi konsentrasi rata-rata tahunan pengukuran <12 hari yang semakin jauh dari rentang maupun nilai konsentrasi rata-rata aktual. Pada jumlah hari sampling < 24 hari, estimasi nilai rata-rata tahunan jauh dari akurat termasuk batas bawah nilai rentang menjadi lebih tinggi dari nilai sebenarnya.

Bila pengukuran hanya dilakukan pada satu musim, seluruh estimasi konsentrasi rata-rata tahunan berada jauh dari rentang kepercayaan nilai konsentrasi rata-rata tahunan aktual. Pada musim kemarau akan terjadi estimasi nilai konsentrasi rata-rata tahunan yang jauh lebih tinggi dari rentang kepercayaan konsentrasi rata-rata aktual atau *over estimation* (Gambar 3b), sedangkan pada musim hujan akan terjadi sebaliknya atau *underestimation* (Gambar 3c). Meskipun pengukuran dilakukan di dua musim, bila sampling dilakukan pada hari yang berturut-turut di setiap musimnya (Gambar 3d), pada pengukuran 2–104 hari estimasi nilai rentang menjadi sangat lebar dan nilai konsentrasi rata-rata menjadi acak, sehingga meningkatkan ketidakpastian serta hasil estimasi yang jauh dari nilai konsentrasi rata-rata tahunan yang sebenarnya.



Gambar 3. Interval Plot hasil prediksi konsentrasi rata-rata tahunan dari 104 – 12 hari pemantauan (a) tersebar di 12 bulan; (b) hanya di musim kemarau; (c) hanya di musim hujan; (d) mewakili 2 musim, dimana (b-d) pemantauan dilakukan secara kontinu

Tabel 3. Kinerja model prediksi rata-rata tahunan

Variasi Jumlah Hari Pengukuran	Data Diskrit Tersebar Sepanjang Tahun (a)		Data Terakumulasi di 2 Musim (b)	
	MAE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MA (%)	MAE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MA (%)
104 Hari	0.671	98.1%	3.620	89.9%
52 Hari	1.952	94.4%	4.835	86.3%
24 Hari	3.973	88.6%	10.327	70.4%
12 Hari	4.785	86.4%	11.986	65.6%
6 Hari	8.046	77.6%	14.796	57.0%

Untuk menilai akurasi dari prediksi, validasi dilakukan dengan perhitungan galat rata-rata absolut (MAE) dan akurasi (konsentrasi) rata-rata (MA) menggunakan data tahun 2022 (Tabel 3). Pada kolom (a) di Tabel 3 terlihat nilai kesalahan meningkat dengan jumlah hari yang semakin sedikit. Nilai MAE pada hari pemantauan 104 hari sangat kecil (dibawah $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dan dapat dikatakan pengukuran yang akurat dengan akurasi diatas 98%. Sedangkan pada pemantauan 6 hari dalam setahun meski

tersebar sepanjang tahun MAE menjadi lebih dari $8,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Prediksi dengan pemantauan minimal 24 hari dalam periode yang tersebar di 12 bulan dapat menjadi pilihan yang moderat, dengan akurasi telah mendekati 90% dan nilai kesalahan rata-rata mencapai 11% dari atau setara $3.973 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai galat ini $\pm 26\%$ dari angka Baku Mutu Udara Ambien Nasional untuk parameter $\text{PM}_{2.5}$ pada Lampiran VII PP.22 Tahun 2021 sebesar $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

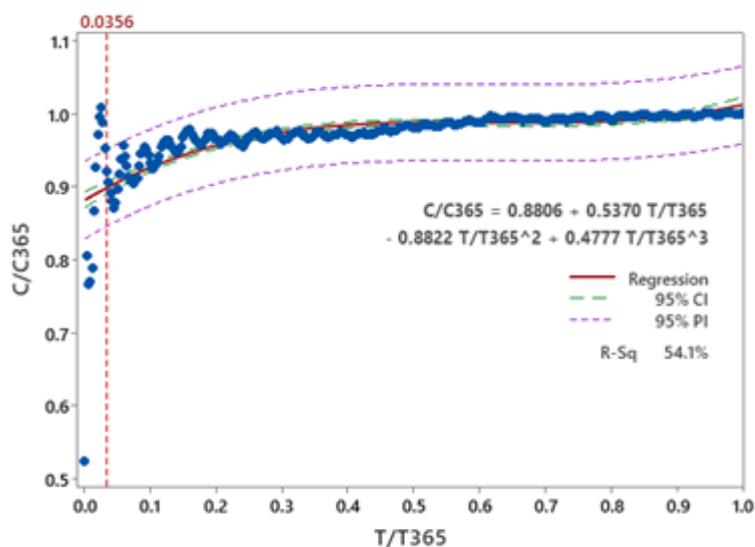
Pemantauan < 24 hari walaupun tersebar di sepanjang tahun akan memiliki resiko nilai kesalahan yang cukup besar, demikian pula bila dilakukan pada hari yang berurutan alih-alih tersebar di setiap bulan walaupun pada 2 musim yang berbeda. Untuk mendapatkan tingkat akurasi yang setara dengan pengukuran 24 hari yang tersebar di sepanjang tahun, pengukuran yang dilakukan di 2 musim namun pada hari yang berurutan membutuhkan jumlah hari pemantauan 104 hari (MAE 3,620 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sedangkan bila dilakukan 24 hari akan menghasilkan kesalahan lebih dari 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ yang setara dengan 63% nilai BMUA untuk rata-rata tahunan (lihat Tabel 3 kolom (b)).

3.3 Model Perhitungan Galat Estimasi Konsentrasi Rata-rata Tahunan $PM_{2.5}$

Pada pembahasan sebelumnya diketahui bahwa jumlah hari pengukuran dapat mempengaruhi akurasi dari prediksi rata-rata tahunan yang dilakukan. Pada pembahasan ini akan dibuktikan pengaruh jumlah hari kurang dari 365 hari terhadap besarnya nilai kesalahan, yang diprediksi dari rasio rata-rata konsentrasi yang diperoleh pada t hari terhadap 365 hari. Titik biru pada Gambar 4a menunjukkan pengaruh rasio jumlah hari pengukuran dibandingkan dengan 365 hari (T/T_{365}) terhadap rasio konsentrasi dari jumlah

T_{365}) terhadap rasio konsentrasi dari jumlah hari terbatas dibandingkan dengan konsentrasi rata-rata dari pengukuran 365 hari (C/C_{365}). Garis ungu putus-putus merupakan batas bawah dan batas atas rentang prediksi 95% nilai individual dari rasio C/C_{365} untuk setiap T/T_{365} . Gambar 4b adalah pendetailan dari Gambar 4a yang menunjukkan ketika jumlah hari pemantauan dalam setahun kurang dari 36 hari ($T/T_{365} < 0.0356$).

Pada Gambar 4a terlihat pada jumlah hari pengukuran kurang dari 5% jumlah data setahun ($T/T_{365} < 0,01$) nilai kesalahan pengukuran lebih besar dan bersifat acak dapat yang menghasilkan estimasi yang lebih atau kurang dari nilai ideal yang setara dengan nilai pengukuran sebenarnya. Pada pengukuran 12 hari ($T/T_{365} = 0.0356$) nilai estimasi berada di luar rentang prediksi nilai individual (Gambar 4b). Dapat disimpulkan pengukuran kurang dari 12 hari dalam setahun ($T/T_{365} = 0,03$) menghasilkan estimasi rata-rata tahunan dengan tingkat kesalahan yang sangat besar. Pengukuran di atas 15 hari ($T/T_{365} > 0.04$) mulai memberikan nilai estimasi rata-rata yang berada pada rentang prediksi nilai individual, dan nilai kesalahan menjadi semakin kecil dengan bertambahnya jumlah hari pengukuran. Pada $T/T_{365} \geq 0,06$ (24



Gambar 4. Scatter plot antara rasio konsentrasi dengan rasio jumlah hari pengukuran (a) pengukuran 1 - 365 hari; dan (b) pengukuran 1 - 36 hari

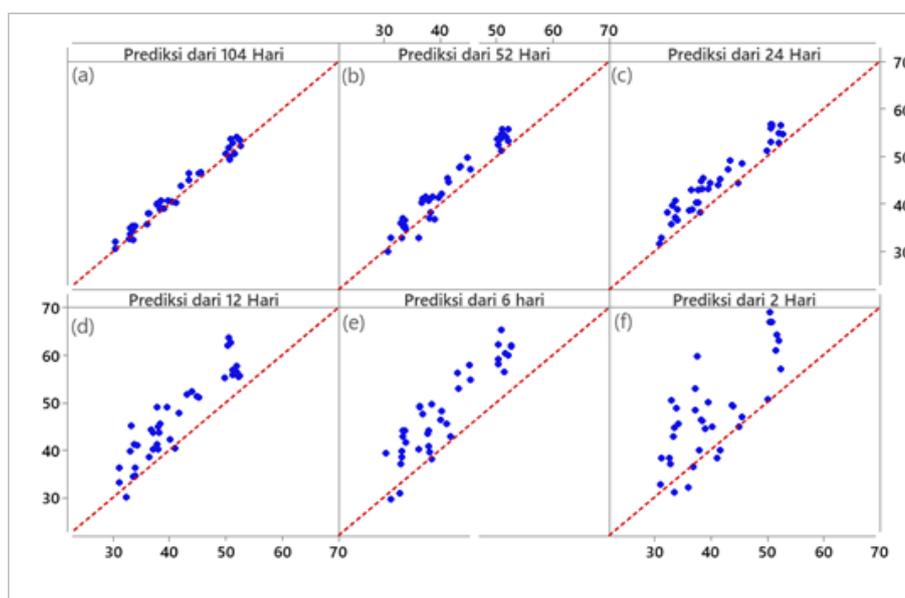
hari atau lebih) nilai galat menjadi semakin mengecil dan cenderung lebih mendekati nilai rata-rata.

Scatter plot pada Gambar 5a-f menguatkan hasil yang diperoleh dari estimasi rata-rata tahunan yang diprediksi melalui model regresi polinomial pada Gambar 4. Analisis statistik melalui uji - t maupun model regresi memprediksi 24 hari tersebar sepanjang tahun adalah jumlah hari pemantauan yang optimum dan efisien untuk mendapatkan nilai konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$. Gambar 5a-b menunjukkan pengukuran lebih dari 24 hari (52 hari dan 104 hari) yang tersebar di 12 bulan akan menghasilkan estimasi rata-rata tahunan yang mendekati nilai sebenarnya. Sedangkan Gambar 5c menunjukkan pengukuran selama 24 hari relatif masih mendekati nilai pengukuran sebenarnya. Namun nilai kesalahan dan overestimation menjadi semakin besar pada jumlah hari pengukuran kurang dari 24 hari seperti terlihat pada pengukuran yang diambil sebanyak 12 kali dalam setahun (Gambar 5d), dan pengukuran menjadi semakin tidak akurat dan acak

dengan jumlah hari pengukuran yang semakin sedikit (Gambar 5e-f). Hasil ini konsisten dengan pembahasan sebelumnya yang menyimpulkan jumlah hari pemantauan untuk menghasilkan konsentrasi rata-rata tahunan minimal adalah sebanyak 24 hari atau 2 kali dalam sebulan.

4. Simpulan

Fluktuasi temporal konsentrasi partikulat, khususnya $PM_{2.5}$ sepanjang tahun menunjukkan perbedaan yang kuat antar musim yaitu mengalami puncak di musim kemarau dan lebih rendah pada musim hujan. Profil konsentrasi tersebut sangat berpengaruh terhadap waktu pengambilan sampel $PM_{2.5}$ yang yang merepresentasikan konsentrasi rata-rata tahunan. Pemantauan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dilakukan tersebar di 12 bulan dapat memberikan prediksi yang akurat, sedangkan pemantauan yang dilakukan hanya pada satu musim, ataupun dua musim dengan hari pengukuran yang berturut-turut belum dapat mewakili konsentrasi rata-rata tahunan.



Gambar 5. *Scatter plot* dari hasil prediksi konsentrasi $PM_{2.5}$ rata-rata tahunan (a) dari 104 hari; (b) 52 hari; (c) 24 hari; (d) 12 hari; (e) 6 hari; (f) 2 hari dalam yang tersebar di 12 bulan periode 2019 s.d 2021 sesuai ketersediaan data pada 7 stasiun pemantauan

Selain waktu pengambilan sampel, ditemukan jumlah hari minimum yang optimum dan efisien untuk memprediksi rata-rata tahunan, yaitu 24 hari tersebar di sepanjang tahun. Nilai rata-rata akurasi dengan jumlah data tersebut mencapai 88.59%. Jumlah hari ini lebih sedikit dari persyaratan internasional yang ditentukan oleh WMO/GAW untuk pengukuran konsentrasi partikulat (± 60 hari). Namun, perbandingan pada nilai konsentrasi rata-rata tahunan antara 24 hari dan per 6 hari sesuai dengan protokol WMO/GAW membuktikan tidak ditemukan perbedaan yang signifikan secara statistik, menunjukkan pengukuran sebanyak 24 kali telah cukup untuk menghasilkan nilai konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ yang representatif. Model prediksi serta waktu dan jumlah hari optimum pengambilan sampel untuk mengestimasi konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ ini dapat digunakan untuk lokasi di wilayah tipikal perkotaan lainnya di Indonesia. Pola temporal tahunan yang menghasilkan persyaratan jumlah data ini hanya berlaku untuk $PM_{2.5}$ dan kemungkinan PM_{10} , namun belum tentu berlaku untuk pencemar gas karena adanya kemungkinan perbedaan karakteristik temporal.

Selain memenuhi persyaratan 24 hari sepanjang tahun, pengukuran perlu dilakukan dengan metode yang telah diakui tingkat akurasi dan presisinya. Untuk mengurangi potensi bias akibat kesalahan pengukuran, metode ini dianjurkan hanya diterapkan pada pengukuran partikulat berbasis gravimetrik yang telah terkategori sebagai metode referensi/ekivalen. Pengambilan dan analisis sampel perlu dilakukan sesuai SNI oleh laboratorium terakreditasi sehingga kualitas data yang dihasilkan akan lebih terjamin. Penggunaan peralatan pengukuran yang belum teruji sebagai metode referensi atau ekivalen berpotensi akan meningkatkan kesalahan pengukuran, terutama bila jumlah data lebih sedikit dari yang disyaratkan untuk menghasilkan nilai rata-rata tahunan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pihak terkait dengan data pemantauan $PM_{2.5}$ di DKI Jakarta. DLH Provinsi DKI Jakarta telah menyediakan data dari SPKUA Provinsi DKI Jakarta berdasarkan Nota Kesepakatan Bersama antara DLH Provinsi DKI Jakarta dengan Institut Teknologi Bandung tentang “Kerja Sama Bidang Pendidikan, Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat”. Penulis juga mengucapkan terimakasih atas data pemantauan dari dua stasiun $PM_{2.5}$ lainnya diperoleh melalui situs AIRNow dari stasiun milik Kedutaan Besar Amerika Serikat.

4. Kepengarangan

Seluruh penulis merupakan suatu kesatuan tim yang tidak terpisahkan, memberikan kontribusi di setiap bagian. Penulis pertama melakukan observasi metode, penyusunan tulisan dan interpretasi data pada perbaikan akhir manuskrip sedangkan penulis kedua melakukan pengolahan dan interpretasi data statistik serta melakukan penulisan manuskrip..

Daftar Pustaka

- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., Pope, C. A., Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., van Dingenen, R., van Donkelaar, A., Vos, T., Murray, C. J. L., dan Forouzanfar, M. H. (2017): Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6).
- Gusnita, D., dan Cholianawati, N. (2019): Pollutant concentration and trajectory patterns of $PM_{2.5}$ including meteo factors

- in Jakarta City, *JKPK (Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia)*, 4(3), 152. <https://doi.org/10.20961/jkpk.v4i3.35028>.
- Hopke, P. K., Cohen, D. D., Begum, B. A., Biswas, S. K., Ni, B., Pandit, G. G., Santoso, M., Chung, Y. S., Davy, P., Markwitz, A., Waheed, S., Siddique, N., Santos, F. L., Pabroa, P. C. B., Seneviratne, M. C. S., Wimolwattanapun, W., Bunprapob, S., Vuong, T. B., Duy Hien, P., dan Markowicz, A. (2008): Urban air quality in the Asian region. *Science of the Total Environment*, 404(1), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.05.039>.
- Istiana, T., Kurniawan, B., Soekirno, S., Nahas, A., Wihono, A., Nuryanto, D. E., Adi, S. P., dan Hakim, M. L. (2023): Causality Analysis of Air Quality and Meteorological Parameters for PM_{2.5} Characteristics Determination: Evidence from Jakarta. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(9), 1–18. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230014>.
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., dan Amann, M. (2015): Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>.
- KLHK (2020): Rencana Strategis Tahun 2020-2024 Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan, 1–120.
- Kusumaningtyas, S. D. A., Khoir, A. N., Fibriantika, E., dan Heriyanto, E. (2021): Effect of meteorological parameter to variability of Particulate Matter (PM) concentration in urban Jakarta city, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/724/1/012050>.
- Lestari, P., Damayanti, S., dan Arrohman, M. K. (2020): Emission Inventory of Pollutants (CO, SO₂, PM_{2.5}, and NOX) in Jakarta Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 489(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/489/1/012014>.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., dan Geoffrey Vining, G. (2012): *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5th Edition (5 ed.), Wiley, New York.
- PermenLH No.12 (2010): Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 Tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah
- PermenLHK No.27 (2021): Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup.
- Pun, V. C., Kazemiparkouhi, F., Manjourides, J., dan Suh, H. H. (2017): Long-term PM_{2.5} exposure and respiratory, cancer, and cardiovascular mortality in older US adults. *American Journal of Epidemiology*, 186(8), 961–969. <https://doi.org/10.1093/aje/kwx166>.
- Rita, Lestiani, D. D., Hamonangan, E., Santoso, M., dan Yulinawa, H. (2016): Kualitas Udara (PM₁₀ dan PM_{2.5}) untuk melengkapi kajian Indeks Kualitas Lingkungan Hidup. *Jurnal Ecolab*, 10(1), 1–7.
- Santoso, M., Lestiani, D. D., Damastuti, E., Kurniawati, S., Kusmartini, I., Dwi Atmodjo, D. P., Sari, D. K., Muhtarom, T., Permadi, D. A., dan Hopke, P. K. (2020): Long term characteristics of atmospheric particulate matter and compositions in Jakarta, Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2215–2225. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.006>.
- World Meteorological Organization (2016): WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations (GAW Report No.227).
- Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., dan Lian, Y. X. (2016): The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69–E74. <https://doi.org/10.3978%2Fj.issn.2072-1439.2016.01.19>.
- Yang, L., Li, C., dan Tang, X. (2020): The Impact of PM_{2.5} on the Host Defense of Respiratory System. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8(March), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.0009>.
- Yang, Z., Mahendran, R., Yu, P., Xu, R., Yu, W., Godellawattage, S., Li, S., dan Guo, Y. (2022): Health effects of long-term exposure to ambient PM_{2.5} in Asia-Pacific: a systematic review of cohort studies. *Current Environmental Health Reports*, 9(2), 130–151. <https://doi.org/10.1007/s40572-022-00344-w>.