

Pemodelan Geospasial Beban Polusi Udara Jakarta: Integrasi Data AOD dan PM_{2.5} Untuk Menentukan Wilayah Dengan Tingkat Kerawanan Tertinggi

Marthin Abednego Gultom^{*1}, Maran Gultom²

¹Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih, Indonesia

²Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ottow Geisler, Indonesia

Email: ¹marthin.lclmm@gmail.com, ²gultom.maran@gmail.com

Abstrak

Polusi udara partikulat halus (PM_{2.5}) merupakan ancaman kesehatan lingkungan utama di Jakarta. Meskipun pemantauan berbasis stasiun darat memberikan akurasi tinggi, keterbatasan jumlah sensor menyebabkan adanya celah informasi geospasial. Di sisi lain, data satelit *Aerosol Optical Depth* (AOD) menawarkan cakupan luas namun sering kali memiliki bias dalam merepresentasikan konsentrasi polutan di permukaan tanah. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan beban polusi udara di Jakarta secara geospasial dengan mengintegrasikan data satelit AOD (MODIS MCD19A2) dan data *ground-station* PM_{2.5} periode Desember 2022 hingga Maret 2025 untuk menentukan wilayah dengan tingkat kerawanan tertinggi. Metodologi penelitian melibatkan sinkronisasi data temporal, normalisasi *Max-Scaling*, dan penerapan model integrasi terbobot. Untuk meminimalkan bias atmosfer atas dan memprioritaskan risiko kesehatan nyata, diterapkan pembobotan variabel sebesar 80% untuk PM_{2.5} dan 20% untuk AOD. Lima titik pemantauan dianalisis, yaitu Bundaran HI, Kelapa Gading, Jagakarsa, Lubang Buaya, dan Kebon Jeruk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah Lubang Buaya (Jakarta Timur) memiliki tingkat kerawanan tertinggi dengan skor indeks gabungan sebesar 0,966 dan rata-rata konsentrasi PM_{2.5} sebesar 76,91 µg/m³. Wilayah Kebon Jeruk menempati peringkat kedua (0,951), sementara Jagakarsa tercatat sebagai wilayah dengan kerawanan terendah (0,864). Penelitian ini menyimpulkan bahwa model integrasi terbobot efektif dalam mengidentifikasi titik panas (*hotspot*) polusi yang sering kali tidak tertangkap sepenuhnya oleh sensor satelit tunggal. Hasil ini merekomendasikan perlunya intervensi kebijakan mitigasi yang lebih intensif di wilayah Jakarta Timur dan Barat sebagai zona kerawanan pencemaran polusi udara prioritas.

Kata kunci: AOD, Geospasial, Jakarta, PM_{2.5}, Polusi Udara.

Abstract

Fine particulate matter (PM_{2.5}) represents a primary environmental health threat in Jakarta. While ground-based monitoring provides high accuracy, the limited number of sensors results in significant geospatial data gaps. Conversely, satellite-derived Aerosol Optical Depth (AOD) offers extensive coverage but often exhibits biases in representing ground-level pollutant concentrations. This study aims to geospatially model air pollution loads in Jakarta by integrating AOD satellite data (MODIS MCD19A2) and ground-station PM_{2.5} data from December 2022 to March 2025 to identify areas with the highest vulnerability. The methodology involves temporal data synchronization, Max-Scaling normalization, and the implementation of a weighted integration model. To minimize upper-atmospheric bias and prioritize actual ground-level health risks, a variable weighting of 80% for PM_{2.5} and 20% for AOD was applied. Five strategic monitoring sites were analyzed: Bundaran HI, Kelapa Gading, Jagakarsa, Lubang Buaya, and Kebon Jeruk. The results indicate that Lubang Buaya (East Jakarta) exhibits the highest vulnerability level, with a combined index score of 0.966 and an average PM_{2.5} concentration of 76.91 µg/m³. Kebon Jeruk ranks second (0.951), while Jagakarsa recorded the lowest vulnerability score (0.864). This study concludes that the weighted integration model is effective in identifying pollution hotspots that are often not fully captured by single satellite sensors. These findings suggest the necessity for more intensive mitigation policies in East and West Jakarta as priority vulnerability zones.

Keywords: Air pollution, AOD, Geospatial, Jakarta, PM_{2.5}.

1. PENDAHULUAN

Polusi udara telah menjadi tantangan lingkungan paling krusial bagi daerah Jakarta dalam beberapa dekade terakhir. Konsentrasi partikulat halus atau PM_{2.5} (*Particulate Matter* dengan diameter < 2,5 µm) secara konsisten melampaui ambang batas aman yang ditetapkan oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), yang berdampak langsung pada peningkatan risiko penyakit pernapasan dan kardiovaskular bagi jutaan penduduknya. Partikulat halus PM_{2.5} (partikulat dengan diameter aerodinamis ≤ 2,5 µm) telah diidentifikasi sebagai salah satu polutan udara paling berbahaya bagi kesehatan manusia, terutama di daerah perkotaan tropis yang padat penduduk (World Health Organization [WHO], 2021). PM_{2.5} dapat menembus saluran pernapasan hingga alveoli paru-paru, memicu penyakit kardiovaskular, gangguan pernapasan kronis, dan bahkan kematian dini (Cohen et al., 2017). Selain dampak kesehatan, akumulasi PM_{2.5} mengurangi jarak pandang (*visibility*), memengaruhi kualitas ekosistem, dan lebih lanjut memperburuk efek pemanasan global melalui interaksi dengan radiasi matahari (Lelieveld et al., 2019).

Jakarta sebagai salah satu kota tropis terpadat di dunia sering mengalami konsentrasi PM_{2.5} yang jauh melebihi ambang aman WHO (25 µg/m³ rata-rata 24-jam) (Luhar et al., 2022). Musim kemarau dan aktivitas transportasi serta industri yang tinggi menjadi faktor utama peningkatan akumulasi partikulat (Kusumaningtyas, 2018). Oleh karena itu, pemantauan yang akurat dan kontinu terhadap PM_{2.5} menjadi prioritas demi mitigasi risiko kesehatan publik.

Meskipun pemantauan melalui stasiun darat (*ground-station*) memberikan data dengan akurasi tinggi, keterbatasan jumlah sensor yang hanya tersebar di lima titik utama di Jakarta (Bundaran HI, Kelapa Gading, Jagakarsa, Lubang Buaya, dan Kebon Jeruk) menyisakan celah informasi geospasial yang signifikan, di mana wilayah-wilayah di antara stasiun tersebut sering kali tidak terpetakan beban polusinya secara presisi.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, teknologi penginderaan jauh melalui parameter *Aerosol Optical Depth* (AOD) dari satelit MODIS telah banyak diadopsi sebagai solusi proksi spasial yang luas (Gupta et al., 2006; Van Donkelaar et al., 2016). Namun, penggunaan AOD secara tunggal menghadapi tantangan teknis berupa diskrepansi antara beban aerosol kolom atmosfer total dengan konsentrasi partikulat di permukaan tanah (Hoff & Christopher, 2009). Ketidaksinkronan ini seringkali dipengaruhi oleh faktor meteorologi dan tinggi lapisan batas planet (*Planetary Boundary Layer*), sehingga memerlukan teknik koreksi bias yang lebih canggih untuk estimasi yang presisi (Sorek-Hamer et al., 2013; Zhang et al., 2021).

Untuk mengatasi keterbatasan spasial tersebut, teknologi penginderaan jauh melalui satelit menawarkan parameter *Aerosol Optical Depth* (AOD) sebagai solusi pemetaan yang lebih luas (Gupta et al., 2006; Van Donkelaar et al., 2016). Namun, penggunaan AOD secara tunggal tetap menyisakan tantangan teknis; sebagai pengukur total kolom aerosol di atmosfer, data ini terkadang menunjukkan diskrepansi dengan konsentrasi polutan di permukaan tanah yang dihirup manusia (Hoff & Christopher, 2009). Ketidaksinkronan ini seringkali dipengaruhi oleh faktor meteorologi dan tinggi lapisan batas planet (*Planetary Boundary Layer*) (Sorek-Hamer et al., 2013; Zhang et al., 2021).

Penelitian mengenai hubungan AOD dan PM_{2.5} di Jakarta telah dimulai oleh Gultom dan Gultom (2025) yang mengidentifikasi adanya tren fluktuasi polusi dan korelasi kuat antara kedua variabel tersebut selama periode Desember 2022 hingga Maret 2025. Meskipun memberikan fondasi data yang penting, penelitian tersebut memiliki keterbatasan metodologis karena hanya berfokus pada analisis statistik korelasi tanpa melakukan integrasi model pemetaan. Terdapat celah penelitian (*research gap*) di mana pemetaan wilayah kerawanan belum menyentuh aspek pembobotan variabel yang mempertimbangkan risiko kesehatan manusia. Selain itu, studi di kota berkembang lainnya menunjukkan bahwa integrasi model hibrida antara data permukaan dan satelit lebih efektif dalam mengisi "titik buta" geospasial dibandingkan analisis korelasi terpisah (Liu et al., 2005; Van Donkelaar et al., 2016).

Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menerapkan pemodelan geospasial yang mengintegrasikan kedua sumber data tersebut. Dengan menerapkan pembobotan yang ideal dengan memprioritaskan data *ground-truth* PM_{2.5} sebagai indikator risiko kesehatan utama dan data AOD sebagai proksi spasial (Ilahi et al., 2024), penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan peta kerawanan

yang lebih akurat. Melalui pendekatan ini, "titik panas" (*hotspot*) polusi dapat diidentifikasi secara lebih tajam untuk mendukung kebijakan mitigasi yang lebih tertarget.

Tujuan dari penelitian ini adalah: Memodelkan distribusi geospasial beban polusi udara di Jakarta secara komprehensif berdasarkan integrasi data satelit AOD dan konsentrasi PM_{2.5} permukaan; Menerapkan teknik pembobotan variabel (80% PM_{2.5} dan 20% AOD) untuk meminimalkan bias data atmosfer atas dalam menentukan profil kerawanan wilayah; Mengidentifikasi dan memeringkatkan wilayah dengan tingkat kerawanan polusi tertinggi hingga terendah untuk menentukan prioritas intervensi lingkungan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini difokuskan pada wilayah Jakarta dengan mengambil data dari lima titik pemantauan strategis yang mewakili lima wilayah kota administrasi: DKI1 (pusat): Bundaran HI, DKI2 (utara): Kelapa Gading, DKI3 (selatan): Jagakarsa, DKI4 (timur): Lubang Buaya, DKI5 (barat): Kebon Jeruk. Rentang waktu data yang dianalisis mencakup periode Desember 2022 hingga Maret 2025, yang merepresentasikan dinamika polusi udara pasca-pandemi serta mencakup berbagai variasi musim di Indonesia, mulai dari kondisi kelembapan tinggi pada siklus musim hujan dengan efek pembersihan polutan (*wash-out*) hingga kondisi atmosfer kering pada musim kemarau yang cenderung memicu akumulasi partikulat di atmosfer.

Penelitian ini mengintegrasikan dua jenis data utama dalam pemodelan geospasial yang dilakukan. Pertama adalah data stasiun darat (*ground-station*) PM_{2.5}, yang mencakup konsentrasi partikulat halus harian yang telah diolah menjadi rata-rata bulanan dalam satuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Data ini berperan sebagai *ground truth* atau referensi utama untuk validasi kualitas udara di permukaan tanah. Kedua adalah data satelit *Aerosol Optical Depth* (AOD) dari produk MODIS MCD19A2 yang diekstraksi melalui Google Earth Engine. Sebagai variabel tanpa satuan, AOD merepresentasikan total beban aerosol di seluruh kolom atmosfer, yang kemudian dikorelasikan dengan data permukaan.

Data PM_{2.5} diperoleh dari lima Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SPKU) di Jakarta, yaitu di Bundaran HI, Kelapa Gading, Jagakarsa, Lubang Buaya, dan Kebon Jeruk. Data bersumber dari satudata.jakarta.go.id dan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jakarta. Data PM_{2.5} diambil dari satudata.jakarta.go.id terkait Data Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Provinsi Jakarta, yang mengintegrasikan pengukuran dari 1 sumber nasional yaitu dari Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SPKU) Dinas Lingkungan Hidup. Pengukuran PM_{2.5} direkam harian (rata-rata 24 jam) dalam satuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kelima stasiun yang digunakan untuk memperoleh data PM_{2.5}, beserta koordinat dan periode ketersediaannya, adalah: DKI1 – Bundaran HI (106.82265 E, -6.19521 N) data Des 2022–Mar 2025 (gap Des 2023); DKI2 – Kelapa Gading (106.89363 E, -6.13704 N) data Des 2022–Mar 2025 (gap Des 2023); DKI3 – Jagakarsa (106.80644 E, -6.34192 N) data Des 2022–Mar 2025 (gap Des 2023); DKI4 – Lubang Buaya (106.97430 E, -6.31064 N) data Des 2022–Mar 2025 (gap Des 2023); DKI5 – Kebon Jeruk (106.77330 E, -6.17150 N) data Des 2022–Mar 2025 (gap Jan-Agu 2023 serta Des 2023).

Data AOD diperoleh dari satelit MODIS (produk MCD19A2) Geokomputasi yang diakses melalui platform *Google Earth Engine*. Data ini memiliki resolusi spasial 1 km dan temporal harian, yang kemudian diolah menjadi data bulanan dengan filter kualitas (QA Flag 0–2). Data *Aerosol Optical Depth* (AOD) diambil pada lima titik lokasi sesuai lokasi lima stasiun yang digunakan untuk memperoleh data PM_{2.5}. Data *Aerosol Optical Depth* (AOD) diambil dari koleksi MODIS MCD19A2_L2 (*Terra/Aqua, Collection 6.1*) melalui *Google Earth Engine* (GEE) (Van Donkelaar *et al.*, 2016; *Google Earth Engine*, 2024). Produk AOD yang digunakan adalah “*Optical_Depth_047*” (band 550 nm), dengan *quality-flag* = “good” (MODIS QA Flag 0–2) untuk meminimalkan bias akibat awan (Shi *et al.*, 2019).

Proses analisis dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis menggunakan bahasa pemrograman dan perangkat lunak *Jupyter Notebook*:

- Pra-pemrosesan Data (*Data Preprocessing*): Data dari kedua sumber dibersihkan dari nilai kosong (*missing values*) dan diselaraskan secara temporal berdasarkan bulan observasi. Rata-rata konsentrasi untuk setiap stasiun dihitung untuk mendapatkan gambaran beban polusi jangka panjang.

- Normalisasi *Max-Scaling*: Mengingat PM_{2.5} dan AOD memiliki satuan yang berbeda, dilakukan normalisasi menggunakan teknik *Max-Scaling* untuk menyamakan skala data menjadi rentang 0 hingga 1. Hal ini memastikan bahwa kontribusi setiap parameter dalam skor gabungan bersifat proporsional terhadap nilai tertingginya. Rumus yang digunakan adalah:

$$X_{norm} = \frac{x}{x_{max}} \quad (1)$$

- Pemodelan Geospasial Terbobot: Penelitian ini menerapkan model integrasi terbobot untuk menghitung Skor Kerawanan (SK). Mengingat PM_{2.5} adalah indikator risiko kesehatan langsung di permukaan tanah, bobot yang diberikan lebih besar dibandingkan AOD satelit. Bobot 80/20 dipilih untuk meminimalkan ketidakpastian data atmosfer atas (AOD) dan memprioritaskan kebenaran data lapangan (*ground truth*). Persamaan model adalah:

$$SK = (0,8 \times Norm_{PM_{2.5}}) + (0,2 \times Norm_{AOD}) \quad (2)$$

- Penentuan Peringkat dan Visualisasi: Wilayah diperingkat berdasarkan Skor Kerawanan tertinggi. Hasilnya dipetakan secara interaktif menggunakan perangkat lunak untuk memvisualisasikan distribusi geospasial beban polusi di seluruh wilayah Jakarta.

Penentuan bobot sebesar 80% untuk konsentrasi PM_{2.5} dan 20% untuk nilai AOD didasarkan pada prinsip keutamaan data observasi permukaan (*ground-truth priority*). Secara statistik, pendekatan ini mengadopsi logika *Weighted Linear Combination* (WLC), di mana variabel dengan tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) yang lebih rendah diberikan kontribusi yang lebih dominan dalam pembentukan indeks (Malczewski, 2010). Penggunaan bobot 80% pada PM_{2.5} merupakan bentuk koreksi terhadap keterbatasan sensor satelit dalam mendeteksi partikulat di tingkat permukaan tanah (lapisan pernapasan manusia). Sebagaimana dinyatakan oleh Hoff dan Christopher (2009), data AOD mengukur total kolom aerosol di seluruh atmosfer, sehingga kontribusinya terhadap estimasi paparan di permukaan tanah memiliki tingkat bias yang lebih tinggi dibandingkan sensor darat. Lebih lanjut, pemilihan porsi 20% untuk AOD merujuk pada fungsinya sebagai proksi spasial, bukan sebagai validator utama. Dalam studi pemodelan kualitas udara di wilayah dengan keterbatasan stasiun pemantau, data satelit secara metodologis digunakan untuk memberikan konteks distribusi spasial (kontinuitas data), sementara data stasiun darat digunakan sebagai jangkar validitas (*anchoring*) (Van Donkelaar et al., 2016). Pendekatan pembobotan asimetris ini juga selaras dengan teknik *Proxy-based Validation* yang menekankan bahwa dalam analisis risiko kesehatan, data yang diukur langsung pada titik paparan manusia (*near-surface measurements*) harus memiliki signifikansi statistik yang jauh lebih tinggi dibandingkan data penginderaan jauh yang bersifat tidak langsung (Chu et al., 2003). Dengan demikian, skema 80/20 ini dipilih sebagai langkah mitigasi untuk meminimalkan *overestimation* yang sering terjadi pada penggunaan data AOD secara tunggal di wilayah tropis dengan tutupan awan yang dinamis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan terhadap dua parameter utama, yaitu konsentrasi PM_{2.5} dari lima stasiun darat dan nilai *Aerosol Optical Depth* (AOD) dari sensor satelit MODIS selama periode Desember 2022 hingga Maret 2025. Data menunjukkan bahwa konsentrasi rata-rata PM_{2.5} di seluruh wilayah Jakarta melampaui ambang batas tahunan yang ditetapkan dimana ambang aman WHO yaitu 25 µg/m³ rata-rata 24-jam. Secara spesifik, Lubang Buaya (DKI4) mencatatkan konsentrasi rata-rata tertinggi sebesar 76,91 µg/m³, diikuti oleh Kebon Jeruk (72,58 µg/m³) dan Kelapa Gading (71,03 µg/m³). Sebaliknya, Jagakarsa mencatatkan nilai terendah sebesar 67,93 µg/m³.

Data satelit menunjukkan pola yang sedikit berbeda pada kolom atmosfer atas. Nilai rata-rata AOD tertinggi justru ditemukan di wilayah Kelapa Gading (0,466) dan Kebon Jeruk (0,457), sementara Lubang Buaya berada pada angka moderat yaitu 0,388. Hal ini mengindikasikan bahwa beban aerosol di atmosfer atas tidak selalu berbanding lurus secara linear dengan polusi di permukaan tanah.

Interpretasi terhadap hubungan antara *Aerosol Optical Depth* (AOD) dan $PM_{2.5}$ memerlukan pemahaman mendalam mengenai struktur vertikal atmosfer. Nilai AOD yang tinggi namun diikuti oleh konsentrasi $PM_{2.5}$ yang rendah di permukaan tanah mengindikasikan bahwa partikulat polutan terkonsentrasi di lapisan atmosfer atas akibat transpor jarak jauh dan tidak terdistribusi ke dalam lapisan batas (*boundary layer*) yang bersentuhan langsung dengan manusia (Hoff & Christopher, 2009). Sebaliknya, kondisi AOD rendah dengan $PM_{2.5}$ tinggi mengindikasikan adanya polusi lokal yang sangat pekat di permukaan, namun lapisan atmosfer di atasnya cenderung bersih, sehingga tidak terdeteksi secara signifikan oleh sensor optik satelit (Gupta et al., 2006).

Diskrepansi ini sering kali dipengaruhi oleh faktor meteorologi seperti kecepatan angin dan stabilitas atmosfer. Di wilayah dengan emisi lokal yang dominan namun sirkulasi udaranya buruk, polutan $PM_{2.5}$ akan terperangkap di dekat permukaan tanah akibat fenomena inversi suhu, menciptakan risiko kesehatan yang ekstrem meskipun kolom aerosol secara total tampak moderat pada citra satelit (Sorek-Hamer et al., 2013). Oleh karena itu, ketergantungan tunggal pada data AOD untuk menentukan kebijakan kesehatan publik dapat menyebabkan kesalahan estimasi risiko (*underestimation*), terutama di area pemukiman padat yang memiliki sumber polusi rendah-permukaan seperti emisi kendaraan dan aktivitas domestik (Paciorek et al., 2008).

Integrasi data melalui pembobotan (seperti skema 80/20) menjadi solusi teknis untuk menjembatani keterbatasan tersebut melalui pendekatan model hibrida (Liu et al., 2005). Dengan memprioritaskan data stasiun darat, model ini memastikan bahwa skor kerawanan yang dihasilkan benar-benar mencerminkan beban polusi yang dihirup langsung oleh penduduk. Sementara itu, porsi kontribusi dari AOD tetap dipertahankan untuk memberikan konteks spasial yang tidak terjangkau oleh kabel sensor darat, memungkinkan estimasi beban polusi di wilayah "titik buta" di antara stasiun-stasiun pemantau tetap di Jakarta (Van Donkelaar et al., 2016).

Melalui penggabungan kedua parameter dengan bobot 80% $PM_{2.5}$ dan 20% AOD, dihasilkan skor kerawanan gabungan sebagai berikut:

Wilayah Pemantauan	Rata-rata $PM_{2.5}$	Rata-rata AOD	Skor Kerawanan	Peringkat
Lubang Buaya	76,91	0,388	0,966	1
Kebon Jeruk	72,58	0,457	0,951	2
Kelapa Gading	71,03	0,466	0,939	3
Bundaran HI	70,35	0,448	0,924	4
Jagakarsa	67,93	0,368	0,864	5

Gambar 1. Skor Kerawanan Terintegrasi

Identifikasi Lubang Buaya sebagai wilayah dengan tingkat kerawanan tertinggi (Skor 0,966) merupakan temuan krusial dalam penelitian ini. Meskipun nilai AOD di wilayah ini relatif lebih rendah dibandingkan Jakarta Barat atau Utara, tingginya angka $PM_{2.5}$ di permukaan menunjukkan adanya akumulasi polutan yang signifikan pada lapisan pernapasan manusia. Fenomena ini diduga kuat dipengaruhi oleh intensitas emisi lokal dari transportasi logistik di Jakarta Timur yang berinteraksi dengan kondisi meteorologi lokal, khususnya rendahnya ketinggian lapisan batas planet (*Planetary Boundary Layer* atau PBL).

Secara meteorologis, ketinggian PBL menentukan volume ruang di mana polutan dapat terdilusi; ketika ketinggian PBL rendah, polutan terperangkap dalam lapisan tipis di dekat permukaan tanah, yang menyebabkan lonjakan konsentrasi $PM_{2.5}$ meskipun beban aerosol di seluruh kolom atmosfer (AOD) tampak moderat (Stull, 1988; Du et al., 2020). Kondisi ini sering diperburuk oleh stabilitas atmosfer yang mencegah pencampuran vertikal, sehingga menciptakan diskrepansi antara pengamatan satelit dan

sensor darat (Miao et al., 2018). Di wilayah Lubang Buaya, pola ini mengindikasikan bahwa risiko kesehatan didominasi oleh polusi "permukaan" yang tidak terdispersi secara efisien ke atmosfer atas, menjadikan masyarakat di wilayah tersebut terpapar konsentrasi polutan yang lebih pekat dalam durasi yang lebih lama.

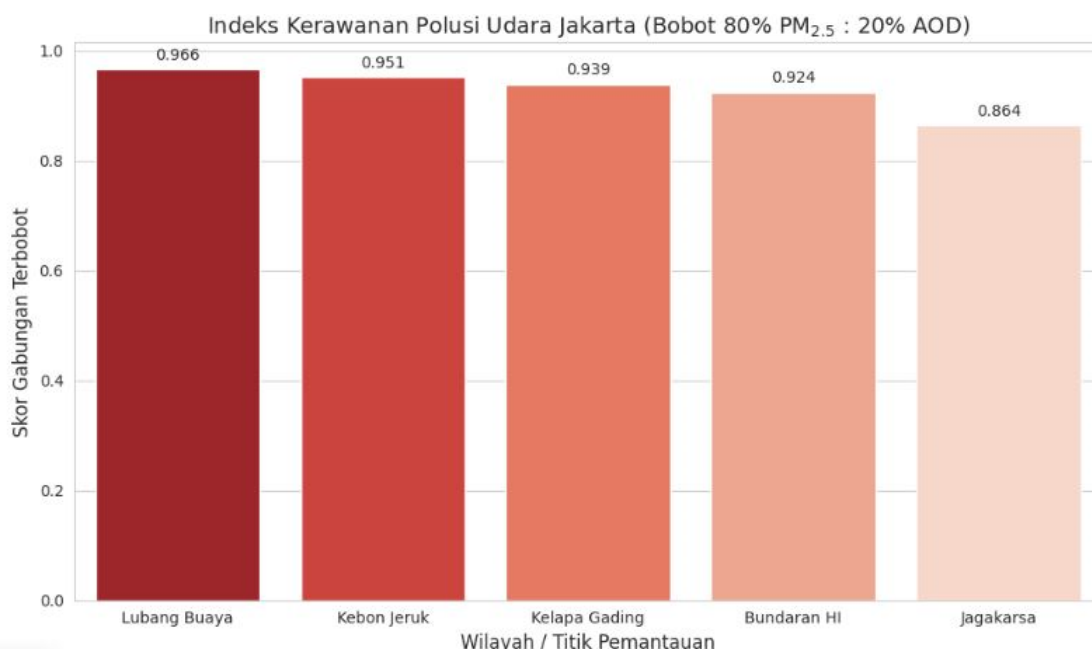
--- PERINGKAT KERAWANAN POLUSI UDARA TERBOBOT (80/20) ---

	Rata_PM25	Rata_AOD	Skor_Kerawanan
Lubang Buaya	76.912	0.388	0.966
Kebon Jeruk	72.580	0.457	0.951
Kelapa Gading	71.027	0.466	0.939
Bundaran HI	70.349	0.448	0.924
Jagakarsa	67.930	0.368	0.864

Gambar 2. Peringkat Kerawanan Polusi Udara

Terdapat perbedaan peringkat jika hanya menggunakan satu parameter. Sebagai contoh, jika hanya menggunakan AOD, Kelapa Gading akan menjadi wilayah paling rawan. Namun, kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa masyarakat di Lubang Buaya menghirup partikulat $PM_{2.5}$ yang lebih padat. Hal ini memvalidasi penggunaan model pembobotan 80/20, di mana data *ground-truth* harus diberikan prioritas lebih tinggi untuk menentukan risiko kesehatan nyata dibandingkan data atmosfer atas yang ditangkap satelit.

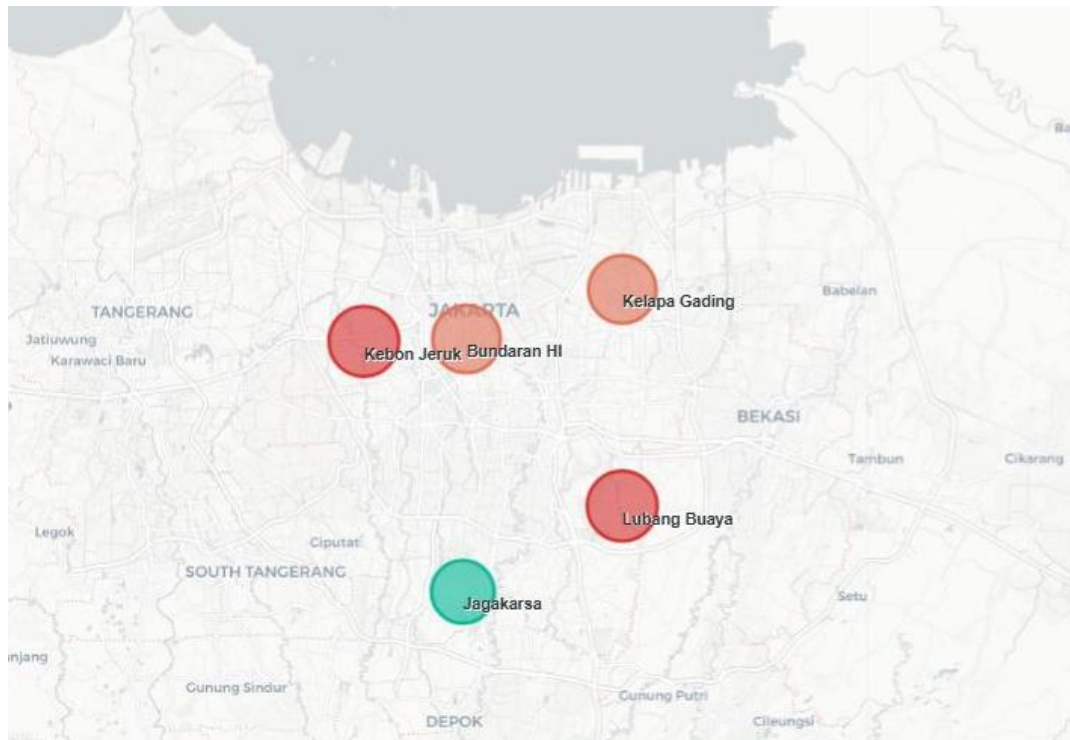
Jagakarsa secara konsisten menempati peringkat terendah dalam skor kerawanan (0,864). Hal ini selaras dengan profil wilayah Jakarta Selatan yang memiliki tutupan vegetasi dan ruang terbuka hijau yang lebih luas dibandingkan wilayah lain. Vegetasi berperan sebagai filter alami yang mampu menyerap sebagian partikulat, sehingga beban polusi baik di permukaan maupun di atmosfer atas cenderung lebih rendah.



Gambar 3. Indeks Kerawanan Polusi Udara Jakarta

Integrasi data ini menghasilkan peta risiko yang lebih komprehensif. Wilayah dengan skor di atas 0,90 (Lubang Buaya, Kebon Jeruk, Kelapa Gading, dan Bundaran HI) dapat dikategorikan sebagai "Zona Merah Kerawanan Polusi". Hasil ini memberikan dasar ilmiah bagi pemerintah untuk melakukan

pengetatan kebijakan lingkungan, seperti penambahan stasiun pemantau di area titik buta (*blind spot*) antara Jakarta Timur dan Jakarta Barat.



Gambar 4. Peta Kerawanan Polusi Udara Jakarta

Berdasarkan hasil visualisasi geospasial yang diperoleh, terlihat adanya distribusi beban polusi udara yang tidak merata di seluruh wilayah Jakarta selama periode pengamatan dari Desember 2022 hingga Maret 2025. Wilayah Jakarta Barat (Kebon Jeruk) dan Jakarta Timur (Lubang Buaya) teridentifikasi sebagai titik panas (*hotspot*) dengan tingkat kerawanan tertinggi, yang ditunjukkan oleh gradien warna merah pekat pada peta analisis. Sebaliknya, wilayah Jakarta Selatan (Jagakarsa) secara konsisten menunjukkan tingkat kerawanan yang paling rendah dibandingkan empat titik pantau lainnya. Temuan ini secara langsung mendukung tujuan utama penelitian, yaitu untuk menentukan wilayah dengan tingkat kerawanan polusi tertinggi melalui integrasi data satelit AOD dan data *ground-station* PM_{2.5}. Perbedaan kontras antara wilayah Barat-Timur dengan wilayah Selatan ini mempertegas adanya variasi spasial yang signifikan dalam kualitas udara Jakarta, yang dipengaruhi oleh karakteristik aktivitas antropogenik serta kondisi geografis di masing-masing wilayah kota administrasi tersebut.

Pendekatan integrasi data dalam penelitian ini memperkuat temuan Li et al. (2019) dan Gupta & Christopher (2021) yang menegaskan bahwa meskipun AOD merupakan proksi yang kuat untuk beban aerosol global, efektivitasnya dalam memprediksi kualitas udara permukaan sangat bergantung pada kondisi lokal dan karakteristik emisi wilayah tersebut. Sejalan dengan argumen Nguyen et al. (2021), variabilitas vertikal aerosol di wilayah tropis yang padat sering kali menciptakan diskrepansi antara sensor satelit dan sensor darat. Penggunaan bobot 80/20 dalam pemodelan ini merupakan langkah strategis untuk memitigasi kelemahan tersebut; dengan memberikan penekanan dominan pada data *ground-truth*, model ini secara efektif meminimalkan "kebisingan" dari data atmosfer atas yang sering kali tidak mencerminkan kondisi di permukaan tanah. Hal ini memastikan bahwa peta kerawanan yang dihasilkan memiliki relevansi klinis dan toksikologis yang lebih tinggi bagi kesehatan masyarakat di Jakarta.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena belum secara eksplisit mengintegrasikan variabel meteorologi seperti kelembapan relatif dan kecepatan angin. Faktor-faktor tersebut diketahui dapat memengaruhi pertumbuhan higroskopis partikel aerosol serta pola dispersi

polutan secara horizontal, yang pada gilirannya dapat memengaruhi akurasi pembacaan AOD dan konsentrasi PM_{2.5} (Li et al., 2019). Namun, terlepas dari batasan tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan melalui pengembangan model integrasi spasial yang pragmatis namun presisi. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada kemampuannya untuk mensinkronisasi keunggulan cakupan luas citra satelit dengan akurasi tinggi data stasiun darat dalam satu indeks kerawanan terpadu. Pendekatan ini menawarkan kerangka kerja baru bagi pengembangan sistem pemantauan kualitas udara di kota-kota besar negara berkembang yang memiliki keterbatasan infrastruktur sensor darat namun membutuhkan pemetaan risiko yang komprehensif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis integrasi data satelit *Aerosol Optical Depth* (AOD) dan data stasiun darat PM_{2.5} melalui pendekatan pemodelan geospasial terbobot, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Identifikasi Wilayah Kerawanan Tertinggi: Pemodelan menunjukkan bahwa wilayah Lubang Buaya (Jakarta Timur) merupakan area dengan tingkat kerawanan polusi udara tertinggi di Jakarta dengan skor indeks gabungan sebesar 0,966. Hal ini didorong oleh konsentrasi rata-rata PM_{2.5} yang mencapai angka tertinggi dibandingkan titik lainnya, yaitu sebesar 76,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wilayah Kebon Jeruk mengikuti di peringkat kedua dengan skor 0,951.
2. Efektivitas Integrasi Data Terbobot: Penggunaan model pembobotan ideal (80% *Ground-Station* PM_{2.5} dan 20% Satelit AOD) terbukti lebih akurat dalam merepresentasikan risiko kesehatan di tingkat permukaan. Pendekatan ini berhasil mengoreksi anomali pada data satelit AOD yang cenderung meremehkan (*underestimate*) polusi di wilayah dengan emisi lokal tinggi seperti Lubang Buaya, sehingga menghasilkan peta kerawanan yang lebih sesuai dengan kondisi riil lapangan.
3. Distribusi Spasial Kerawanan: Terdapat perbedaan kerawanan yang signifikan antar wilayah di Jakarta. Wilayah Timur dan Barat menunjukkan tingkat risiko tinggi, sementara wilayah Jagakarsa (Jakarta Selatan) tercatat sebagai wilayah dengan tingkat kerawanan terendah dengan skor 0,864. Hal ini mengonfirmasi adanya gradien spasial beban polutan yang dipengaruhi oleh faktor geografis dan kepadatan aktivitas di masing-masing wilayah.
4. Validasi Parameter: Meskipun terdapat fluktuasi, integrasi data satelit AOD tetap berperan penting sebagai instrumen pendukung geospasial untuk mengisi celah informasi di area yang tidak terjangkau oleh stasiun pemantau darat, selama dilakukan sinkronisasi dengan data *ground-truth* secara tepat.

Berdasarkan kesimpulan di atas, beberapa langkah strategis direkomendasikan untuk menindaklanjuti temuan penelitian ini:

1. Intervensi Wilayah Prioritas: Pemerintah Provinsi Jakarta perlu menetapkan wilayah Lubang Buaya dan Kebon Jeruk sebagai zona prioritas mitigasi. Hal ini dapat dilakukan melalui peningkatan frekuensi uji emisi kendaraan bermotor, pengetatan pengawasan industri di sekitar wilayah tersebut, serta penambahan Ruang Terbuka Hijau (RTH) sebagai filter udara alami.
2. Optimasi Jaringan Pemantauan: Disarankan untuk menambah jumlah sensor PM_{2.5} darat di wilayah yang memiliki skor AOD tinggi namun belum tercover stasiun pemantau tetap, guna memperkuat akurasi pemodelan geospasial di masa mendatang dan memastikan perlindungan kesehatan warga yang lebih merata.
3. Pengembangan Model Lanjutan: Penelitian selanjutnya dapat memperluas variabel pemodelan dengan mengintegrasikan data meteorologi (kecepatan angin dan kelembapan) serta data penggunaan lahan (*land use*) untuk memahami faktor penyebab akumulasi polutan di titik-titik rawan secara lebih komprehensif.
4. Sistem Peringatan Dini: Diharapkan adanya analisa dan pembuatan basis data bagi Dinas Kesehatan dan Dinas Lingkungan Hidup dalam menyusun sistem peringatan dini (*early warning system*) bagi kelompok rentan di wilayah-wilayah dengan tingkat polusi ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Chu, D. A., Kaufman, Y. J., Zibordi, G., Chern, J. D., Mao, J., Li, C., & Holben, B. N. (2003). Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21). <https://doi.org/10.1029/2002JD003179>
- 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.,... & 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)
- Du, Q., Zhao, C., Zhang, M., Dong, X., Chen, Y., Liu, Z.,... & Li, J. (2020). Modeling diurnal variation of surface PM_{2.5} concentrations over East China with WRF-Chem: Impacts from boundary-layer mixing and anthropogenic emission. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(5), 2839–2863. <https://doi.org/10.5194/acp-20-2839-2020>
- Google Earth Engine. (2024). *Google Earth Engine: A cloud-computing platform for global-scale geospatial analysis*. <https://earthengine.google.com/>
- Gultom, M. A. & Gultom, M. (2025). Analysis of Trends and Correlation Between Ground-based PM_{2.5} and Satellite AOD in Jakarta (Dec 2022–Mar 2025). *International Journal of Science, Technology & Management*, 6(3), 560–568. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v6i3.1216>
- Gupta, P., & Christopher, S. A. (2021). Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112185>
- Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. C., & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5880–5892. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.005>
- Hoff, R. M., & Christopher, S. A. (2009). Remote sensing of particulate matter from space: A review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(6), 645–675. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.6.645>
- Ilahi, I. F. N., Ferdiansyah, E., & Arifianto, F. (2024). Pendugaan PM_{2.5} menggunakan metode geographically temporally weighted regression di DKI Jakarta. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(6), 1435–1440. <https://doi.org/10.14710/jil.22.6.1435-1440>
- Kusumaningtyas, S. D. A., Aldrian, E., Wati, T., Atmoko, D., & Sunaryo, S. (2018). The recent state of ambient air quality in Jakarta. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2343–2354. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0391>
- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R. T., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7192–7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
- Li, J., Carlson, B. E., & Lacis, A. A. (2019). How much can describe the relationship between PM_{2.5} and aerosol optical depth (AOD)? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(24), 15283–15299. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15283-2019>
- Li, Z., Chin, M., & Schwartz, C. S. (2019). Remote sensing of PM_{2.5} from MODIS aerosol optical depth: A global analysis. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1050–1059. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04092>
- Liu, Y., Sarnat, J. A., Kilaru, V., Jacob, D. J., & Koutrakis, P. (2005). Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology*, 39(12), 4625–4633. <https://doi.org/10.1021/es049352m>
- Luhar, A. K., Thatcher, P. J., Rao, P. S., & Kumar, S. (2022). Air quality in Delhi during the COVID-19 pandemic: A spatial and temporal analysis. *Atmospheric Environment*, 272, 118944. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118944>
- Malczewski, J. (2010). Local weighted linear combination. *Transactions in GIS*, 14(3), 263–288.

- <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01201.x>
- Miao, Y., Liu, S., & Huang, S. (2018). Synoptic pattern and planetary boundary layer structure in relation to particulate matter pollution in Zibo, China. *Frontiers in Earth Science*, 6, 14. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00014>
- Nguyen, T. K. N., Xuan, T. L., & Lee, H. (2021). Spatial and temporal analysis of PM_{2.5} and its relationship with aerosol optical depth in tropical urban areas using remote sensing and ground-based data. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 19342–19355. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11894-x>
- Paciorek, C. J., Liu, Y., Moreno-Macias, H., & Kondragunta, S. (2008). Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth and ground-level PM_{2.5}. *Environmental Science & Technology*, 42(15), 5800–5806. <https://doi.org/10.1021/es703181j>
- Shi, Y., Matsunaga, T., Tadono, T., & Morrison, R. J. (2019). Validation and diurnal variation evaluation of MERRA-2 multiple aerosol properties on a global scale. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(23), 14505–14520. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14505-2019>
- Sorek-Hamer, M., Goldberg, V., & Broday, D. M. (2013). A critical review of methods for estimating particulate matter concentrations based on optical satellite data. *Science of The Total Environment*, 452, 202–220
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Hsu, N. C., Kahn, R. A., Levy, R. C., Lyapustin, A., Sayer, A. M., & Winker, D. M. (2016). Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3762–3772. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05833>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
- Zhang, H., & Kondragunta, S. (2021). Daily and hourly surface PM_{2.5} estimation from satellite AOD. *Earth and Space Science*, 8(12), e2020EA001599. <https://doi.org/10.1029/2020EA001599>