

## ANALISIS DINAMIKA PM<sub>2.5</sub> DAN ESTIMASI BERBASIS SATELIT SELAMA KEBAKARAN HUTAN DAN LAHAN

Andriyani Agus<sup>1</sup>, Mochamad Aryono Adhi<sup>2</sup>, Dwi Atmoko<sup>3</sup>,  
Aulia Nisa'ul Khoir<sup>4</sup>

Universitas Negeri Semarang<sup>1,2</sup>  
Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika<sup>3,4</sup>  
[andri21173@students.unnes.ac.id](mailto:andri21173@students.unnes.ac.id)<sup>1</sup>

### ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis dampak karhutla di Provinsi Jambi terhadap Aerosol Optical Depth (AOD) dan konsentrasi partikulat halus (PM<sub>2.5</sub>) menggunakan data in-situ AERONET, pengamatan PM<sub>2.5</sub> dari Stasiun Meteorologi Sultan Thaha Jambi (2020–2023), serta data AOD satelit GEMS. Analisis dilakukan dengan regresi linear sederhana dan korelasi Pearson untuk memperoleh hubungan empiris antara AOD dan PM<sub>2.5</sub> serta divalidasi dengan pengamatan permukaan. Hasil menunjukkan korelasi kuat antara AOD dan PM<sub>2.5</sub>, dengan nilai tertinggi pada panjang gelombang 340 nm dari AERONET ( $r = 0,7824$ ;  $R^2 = 61,21\%$ ) dan 354 nm dari GEMS ( $r = 0,7802$ ;  $R^2 = 60,88\%$ ). Persamaan regresi digunakan untuk mengonversi AOD satelit menjadi estimasi spasial PM<sub>2.5</sub>, yang menunjukkan konsentrasi  $>80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada puncak karhutla September 2023. Peningkatan konsentrasi ini berkaitan dengan meningkatnya jumlah hotspot dan rendahnya curah hujan, sedangkan penurunan PM<sub>2.5</sub> terjadi setelah hujan turun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa AOD satelit dapat digunakan untuk mengestimasi PM<sub>2.5</sub> dan merepresentasikan pola temporal serta spasial polusi udara di Provinsi Jambi selama episode kebakaran.

**Kata kunci:** *Aerosol Optical Depth (AOD); Kebakaran Hutan dan Lahan; Kualitas Udara; PM<sub>2.5</sub>; Remote Sensing*

### ABSTRACT

*This study analyzes the impact of forest and land fires on Aerosol Optical Depth (AOD) and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentrations using in-situ AERONET observations, PM<sub>2.5</sub> measurements from the Sultan Thaha Meteorological Station in Jambi (2020–2023), and satellite-based AOD data from the Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS). Linear regression and Pearson correlation analyses were applied to establish the empirical relationship between AOD and PM<sub>2.5</sub>, with validation against ground-based observations. The results indicate a strong correlation between AOD and PM<sub>2.5</sub>, with the highest values observed at 340 nm from AERONET ( $r = 0.7824$ ;  $R^2 = 61.21\%$ ) and 354 nm from GEMS ( $r = 0.7802$ ;  $R^2 = 60.88\%$ ). The derived regression equation was then used to convert satellite AOD into spatial estimates of PM<sub>2.5</sub>. The resulting distribution maps show widespread pollution, with PM<sub>2.5</sub> concentrations exceeding  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  during the peak fire period in September 2023. This increase coincided with a rise in hotspot activity and low rainfall, while PM<sub>2.5</sub> concentrations decreased following precipitation events.*

*These findings demonstrate that satellite-derived AOD can be used to estimate PM<sub>2.5</sub> concentrations and capture the temporal and spatial patterns of air pollution during fire episodes in Jambi Province.*

**Keywords:** *Aerosol Optical Depth (AOD); Forest Fire; Air Quality; PM<sub>2.5</sub>; Remote Sensing*

## PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan merupakan salah satu tantangan lingkungan utama di Indonesia, terutama pada ekosistem gambut yang sangat rentan terhadap kebakaran. Bersama negara seperti India dan Bangladesh, Indonesia menyumbang sekitar 75% dari beban polusi udara global (Ita, 2023). Kebakaran ini tidak hanya menurunkan kualitas udara tetapi juga meningkatkan risiko gangguan kesehatan, terutama penyakit pernapasan dan kardiovaskular (Karanasiou et al. (2021). Selain itu, tingginya konsentrasi partikulat dapat mengurangi jarak pandang akibat efek hamburan dan absorpsi cahaya matahari (Hartanto et al., 2024).

Provinsi Jambi termasuk wilayah dengan kerentanan kebakaran yang tinggi akibat degradasi lahan gambut yang dipicu oleh deforestasi, pembukaan lahan, dan pengeringan berlebihan (Putra & Husni, 2021; Santosa & Qirom, 2020; Syaufina et al., 2022; Kusuma et al., 2021).

Pada September–Oktober 2023, Jambi mengalami kebakaran hebat yang ditandai dengan peningkatan signifikan jumlah titik panas menurut data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Kebakaran tersebut menghasilkan emisi aerosol yang meningkatkan nilai Aerosol Optical Depth (AOD), indikator penting yang berkaitan dengan konsentrasi partikulat halus (PM<sub>2.5</sub>) dan penurunan kualitas udara (Maulia, 2023; Ehret et al., 2025).

Meskipun data satelit untuk pemantauan aerosol semakin berkembang, kajian mengenai hubungan antara AOD dan PM<sub>2.5</sub> di Indonesia, khususnya di Jambi, masih terbatas dan sering kali belum divalidasi dengan pengamatan berbasis darat. AERONET menyediakan pengamatan aerosol berkualitas tinggi, sementara Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) memungkinkan pemantauan aerosol secara kontinu dalam skala regional (Kim et al., 2020).

Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan empiris antara AOD dan PM<sub>2.5</sub> selama episode kebakaran tahun 2023 di Jambi serta mengembangkan pendekatan konversi AOD untuk mengestimasi PM<sub>2.5</sub>. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data pengamatan berbasis darat dan satelit untuk membangun model estimasi serta memetakan distribusi spasial polusi udara selama kebakaran. Hasil penelitian diharapkan dapat meningkatkan pemahaman dinamika kualitas udara di wilayah gambut rawan kebakaran dan mendukung pengembangan pemantauan kualitas udara berbasis penginderaan jauh untuk mitigasi polusi udara dan perlindungan kesehatan masyarakat.

## METODE PENELITIAN

Analisis dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang mencakup rentang tahun 2020 - 2023, meliputi pengamatan PM<sub>2.5</sub>, *Aerosol Optical Depth* (AOD) dari AERONET,

parameter meteorologi, data titik panas kebakaran, serta data AOD berbasis satelit dari GEMS. Dataset ini dipilih untuk merepresentasikan pengukuran berbasis darat maupun penginderaan jauh, sehingga memungkinkan validasi silang yang lebih kuat antar sumber data. Rincian data yang digunakan dalam penelitian ini tercantum pada Tabel 1.

**Tabel 1.**  
Spesifikasi data

Sumber data	Resolusi temporal	Lokasi/ Resolusi spasial	Periode data	Sumber
Observasi PM <sub>2.5</sub>	harian	Titik	2020 - 2023	BMKG
AOD AERONET	harian	Titik	2020 - 2023	NASA
Data Hotspot	harian	Titik	2022-2024	BMKG
GEMS	perjam	Titik	Tanggal dengan konsentrasi tinggi	<a href="https://nesc.nier.go.kr">https://nesc.nier.go.kr</a>

Pra-pemrosesan data dilakukan dengan menyaring nilai yang tidak valid (misalnya 888, 9999, dan NaN) serta menstandarkan format temporal agar konsisten di seluruh dataset. Analisis hubungan antara Aerosol Optical Depth (AOD) dan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dilakukan menggunakan scatter plot, regresi linear sederhana, dan korelasi Pearson untuk memperoleh hubungan empiris antara kedua variabel. Panjang gelombang AOD dengan korelasi terkuat terhadap PM<sub>2.5</sub> kemudian dipilih dan digunakan untuk mengestimasi AOD pada panjang gelombang yang sesuai dengan pengamatan satelit melalui interpolasi menggunakan metode Ångström Exponent.

Nilai AOD hasil interpolasi selanjutnya dikonversi menjadi estimasi PM<sub>2.5</sub> menggunakan persamaan regresi yang diperoleh dari data in-situ. Pemetaan spasial estimasi

PM<sub>2.5</sub> dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka NumPy, Pandas, Matplotlib, dan Cartopy. Validasi estimasi PM<sub>2.5</sub> berbasis satelit dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi terhadap pengamatan permukaan dalam radius 5 km dari lokasi stasiun pengamatan.

## HASIL PENELITIAN

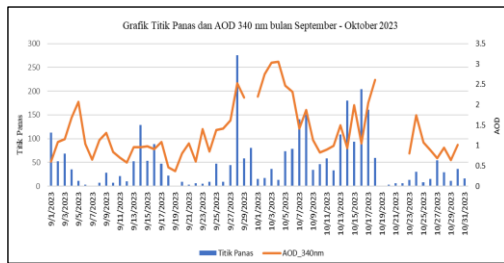
### Dampak Kebakaran terhadap Kualitas Udara

Salah satu parameter utama yang mencerminkan dampak kebakaran hutan dan lahan adalah peningkatan konsentrasi partikel halus (PM<sub>2.5</sub>) serta *aerosol optical depth* (AOD) pada kolom atmosfer. Selama September – Oktober 2023, terlihat adanya hubungan positif yang jelas antara peningkatan jumlah titik panas dengan kenaikan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan AOD. Aktivitas titik panas mencapai puncaknya pada 28 September (275 titik panas) dan 16 Oktober (204 titik panas), yang bertepatan dengan lonjakan nilai AOD masing-masing hingga 2,5 dan lebih dari 3,0 (Gambar 1).

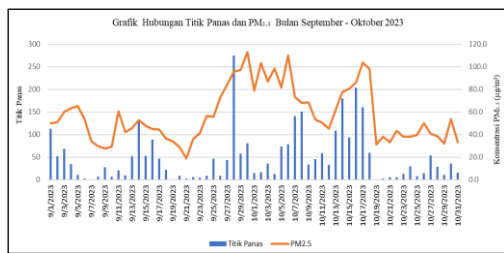
Analisis grafik menunjukkan bahwa PM<sub>2.5</sub> dan AOD cenderung meningkat seiring dengan lonjakan titik panas, khususnya dari akhir September hingga pertengahan Oktober, sebelum secara bertahap menurun seiring dengan berkurangnya aktivitas kebakaran (Gambar 2). Pola ini menegaskan bahwa kejadian kebakaran intensif memberikan kontribusi besar terhadap akumulasi partikel halus dan peningkatan beban aerosol di atmosfer.

Penurunan kualitas udara selama kejadian kebakaran hutan dan lahan juga dapat dibuktikan melalui variasi *Ångström Exponent* (AE), yang memberikan gambaran mengenai

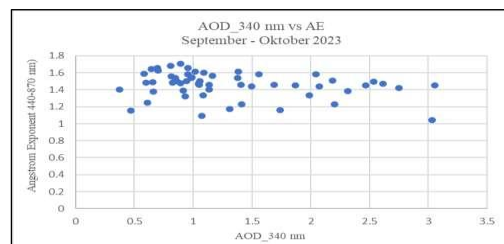
distribusi ukuran partikel aerosol. Nilai AE diturunkan dari kemiringan negatif AOD pada panjang gelombang tertentu; dalam penelitian ini, AOD pada 340 nm dan AE dari rentang 440– 870 nm dianalisis untuk menangkap partikel berukuran halus yang relevan dengan PM<sub>2.5</sub>. Nilai  $\alpha > 1$  umumnya menunjukkan dominasi aerosol halus (<2,5  $\mu\text{m}$ ) yang biasanya terkait dengan pembakaran biomassa, sedangkan  $\alpha < 1$  mencerminkan partikel kasar seperti debu mineral atau garam laut.



**Gambar 1.**  
Hotspots dan AOD 340 nm September – Oktober 2023



**Gambar 2.**  
Hotspots dan PM<sub>2.5</sub> September – Oktober 2023



**Gambar 3.**

*Scatter plot* AOD (340 nm) dan Angstrom Exponent (440 - 870 nm) 2023

Gambar 3 menunjukkan bahwa selama September - Oktober 2023, sebagian besar nilai AE berada di atas 1,2, menandakan prevalensi aerosol berukuran halus yang konsisten dengan emisi dari pembakaran biomassa. Secara bersamaan, nilai AOD pada beberapa titik melampaui 3,0, mencerminkan peningkatan signifikan beban aerosol selama puncak aktivitas kebakaran.

Konsistensi nilai AE yang tinggi bersamaan dengan lonjakan AOD memperkuat bukti bahwa pembakaran biomassa merupakan sumber dominan polusi atmosfer. Penurunan kecil nilai AE pada level AOD yang sangat tinggi (>2,5) mungkin mengindikasikan adanya pencampuran partikel asap halus dengan abu atau debu yang lebih besar, yang semakin menegaskan pengaruh kuat kebakaran hutan dan lahan terhadap kualitas udara di Jambi pada periode tersebut.

### Korelasi dan Regresi antara AOD AERONET dan PM<sub>2.5</sub>

Untuk memperkirakan kualitas udara, hubungan antara AOD hasil pengukuran AERONET dan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dianalisis menggunakan korelasi dan regresi linear sederhana pada beberapa panjang gelombang (340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, dan 1640 nm).

Hasil statistik disajikan pada Tabel 2. Korelasi terkuat diperoleh pada panjang gelombang 340 nm ( $r = 0,7824$ ;  $R^2 = 0,6121$ ), yang menunjukkan bahwa sekitar 61% variabilitas PM<sub>2.5</sub> dapat dijelaskan oleh AOD pada panjang gelombang ini. Sebaliknya, nilai korelasi cenderung menurun seiring bertambahnya panjang

gelombang, hingga mencapai  $r = 0,5526$  dan  $R^2 = 0,3064$  pada 1640 nm. Pola ini mengindikasikan bahwa panjang gelombang yang lebih pendek lebih sensitif terhadap partikel halus, karena  $PM_{2.5}$  lebih efektif dalam menyebarkan cahaya pada rentang ini. Dengan demikian, AOD pada 340 nm merupakan parameter yang paling representatif untuk memperkirakan konsentrasi  $PM_{2.5}$ .

**Tabel 2.**

Korelasi dan regresi antara AOD-AERONET dan observasi  $PM_{2.5}$

No	Panjang Gelombang AOD	r	R <sup>2</sup>	Persamaan Regresi
1	340 nm	0.7824	0.6121	$y = 29.469x + 12.034$
2	380 nm	0.7758	0.6018	$y = 31.165x + 12.516$
3	440 nm	0.7652	0.5857	$y = 34.808x + 13.239$
4	500 nm	0.7586	0.5756	$y = 39.259x + 13.601$
5	675 nm	0.7393	0.5469	$y = 56.495x + 14.457$
6	870 nm	0.7150	0.5117	$y = 80.214x + 14.49$
7	1020 nm	0.6937	0.4819	$y = 98.629x + 14.656$
8	1640 nm	0.5526	0.3064	$y = 133.17x + 18.924$

Data AOD dari jaringan AERONET berbasis darat tersedia pada panjang gelombang standar (340–1640 nm), sedangkan instrumen satelit seperti GEMS (*Geostationary Environment Monitoring Spectrometer*) menyediakan AOD pada panjang gelombang yang berbeda (354, 443, dan 555 nm). Perbedaan spektral ini menimbulkan tantangan dalam proses validasi dan integrasi data. Untuk mengatasi hal tersebut, metode Eksponen Ångström digunakan untuk melakukan interpolasi nilai AOD pada panjang gelombang GEMS. Hasil statistik dirangkum pada Tabel 3.

Korelasi tertinggi dengan  $PM_{2.5}$  ditemukan pada panjang gelombang 354 nm ( $r = 0,7802$ ;  $R^2 = 0,6088$ ), yang menunjukkan bahwa sekitar 61%

variabilitas  $PM_{2.5}$  dapat dijelaskan oleh AOD pada panjang gelombang ini. Dengan demikian, AOD pada 354 nm memiliki potensi paling kuat untuk memperkirakan konsentrasi  $PM_{2.5}$ , dan persamaan regresi yang bersesuaian digunakan untuk menghasilkan estimasi  $PM_{2.5}$  dari data AOD satelit GEMS.

**Tabel 3.**

Korelasi dan regresi antara AOD-GEMS dan observasi

No.	Panjang Gelombang AOD	r	R <sup>2</sup>	Persamaan Regresi
1	354 nm	0.78023	0.6088	$y = 30.893x + 12.181$
2	443 nm	0.76855	0.5907	$y = 40.512x + 12.685$
3	555 nm	0.75409	0.5686	$y = 52.742x + 13.302$

### Estimasi $PM_{2.5}$ menggunakan AOD GEMS berdasarkan Persamaan Empiris

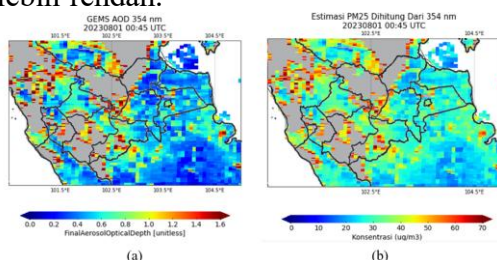
Setelah diperoleh hubungan empiris antara AOD dan  $PM_{2.5}$ , persamaan tersebut diterapkan pada data AOD satelit GEMS pada panjang gelombang 354 nm untuk mengestimasi distribusi spasial  $PM_{2.5}$  di Provinsi Jambi. Analisis difokuskan pada tanggal-tanggal terpilih pada Agustus–September 2023, sehingga memungkinkan evaluasi kondisi dari kejadian kabut asap sedang hingga berat. Validasi estimasi  $PM_{2.5}$  dilakukan dengan menggunakan pengukuran berbasis darat dalam radius 5 km.

Hasil estimasi  $PM_{2.5}$  kemudian diklasifikasikan menggunakan standar kategori kualitas udara yang diterapkan oleh BMKG. Berdasarkan klasifikasi ini, konsentrasi  $PM_{2.5}$  dibagi menjadi lima kategori: Baik ( $0-15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Sedang ( $15,6-55,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Tidak Sehat ( $55,5-150,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Sangat Tidak Sehat ( $150,5-250,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), dan Berbahaya ( $>250,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Kategorisasi ini digunakan untuk menafsirkan variabilitas spasial dan temporal dari konsentrasi PM<sub>2.5</sub> hasil estimasi selama periode penelitian. Analisis ini menyoroti pola distribusi spasial sekaligus tingkat kesesuaian dengan hasil pengamatan in-situ.

*Studi kasus 1 Agustus 2023 (00:45 UTC).*

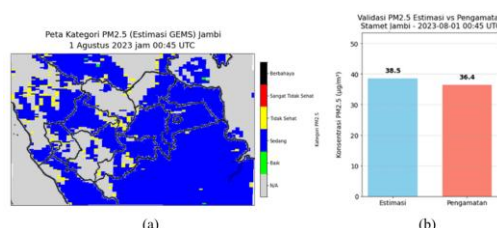
Distribusi spasial AOD dari GEMS dan estimasi PM<sub>2.5</sub> menunjukkan konsentrasi aerosol tinggi di wilayah barat dan tengah Jambi (Bungo, Tebo, dan Batanghari), dengan AOD > 1,2 dan estimasi PM<sub>2.5</sub> mencapai 60 - 70 µg/m<sup>3</sup>. Sebaliknya, wilayah timur dan tenggara (misalnya Tanjung Jabung Timur, sebagian Merangin) menunjukkan nilai yang lebih rendah.



**Gambar 4.**

Citra AOD GEMS 354 nm (a) dan Citra Estimasi PM<sub>2.5</sub> dari AOD GEMS 354 nm (b) Tanggal 1 Agustus Pukul 00:45 UTC

Peta kualitas udara mengindikasikan kondisi yang sebagian besar berada pada kategori Sedang, dengan area lokal berstatus Tidak Sehat di wilayah barat dan tengah. Validasi terhadap pengamatan berbasis darat di Stasiun Sultan Thaha menunjukkan kesesuaian yang baik, dengan estimasi PM<sub>2.5</sub> (38,5 µg/m<sup>3</sup>) hanya berbeda 2,1 µg/m<sup>3</sup> dari data in-situ (36,4 µg/m<sup>3</sup>).

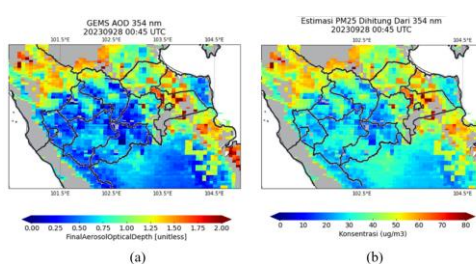


**Gambar 5.**

Peta Kategori Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> Estimasi GEMS (a) dan Grafik Validasi Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> Estimasi vs Pengamatan (b) Tanggal 1 Agustus Pukul 00:45 UTC

*Studi Kasus 28 September 2023 (00:45 UTC).*

Pada 28 September, nilai AOD mencapai level ekstrem (>2,0) di wilayah timur Tanjung Jabung Timur dan daerah utara, sementara Batanghari, Muaro Jambi, dan Tebo mencatat kisaran 0,75 - 1,5. Estimasi PM<sub>2.5</sub> berada dalam rentang 20 hingga >80 µg/m<sup>3</sup>, dengan konsentrasi tertinggi di wilayah tengah dan timur Jambi. Sebagian besar wilayah dikategorikan sebagai Sedang, meskipun beberapa daerah di bagian tengah, utara, dan timur masuk dalam kategori Tidak Sehat.

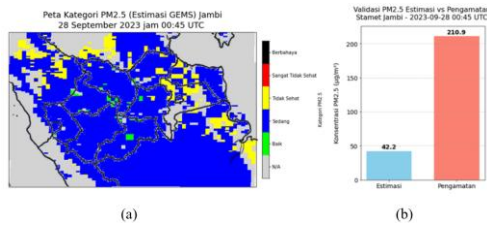


**Gambar 6.**

Citra AOD GEMS 354 nm (a) dan Citra Estimasi PM<sub>2.5</sub> dari AOD GEMS 354 nm (b) Tanggal 28 September Pukul 00:45 UTC

Namun, validasi menunjukkan adanya perbedaan yang sangat besar: estimasi PM<sub>2.5</sub> (42,2 µg/m<sup>3</sup>) jauh lebih rendah dibandingkan nilai pengamatan permukaan (210,9 µg/m<sup>3</sup>). Hal ini mengindikasikan bahwa estimasi satelit

gagal menangkap polusi ekstrem di permukaan, kemungkinan besar disebabkan oleh kabut asap pekat yang terperangkap pada lapisan inversi serta keterbatasan AOD dalam merepresentasikan kondisi polusi di dekat permukaan.

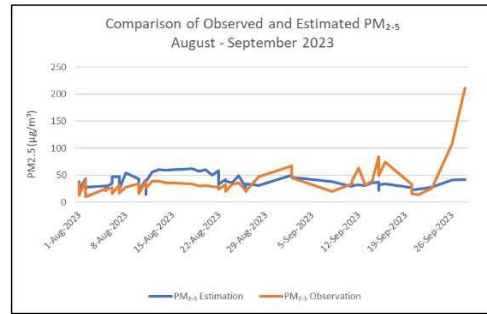


**Gambar 7.**

Peta Kategori Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> Estimasi GEMS (a) dan Grafik Validasi Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> Estimasi vs Pengamatan (b) Tanggal 28 September Pukul 00:45 UTC

### Validasi Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> Hasil Estimasi

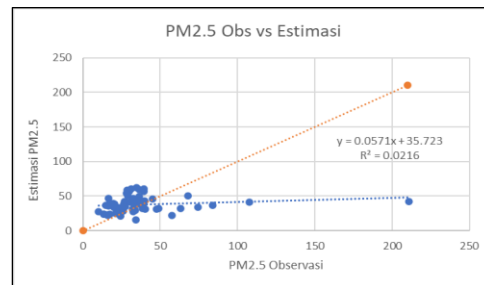
Validasi dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana estimasi PM<sub>2.5</sub> berbasis satelit mampu merepresentasikan kondisi nyata yang tercatat melalui pengukuran in-situ. Proses ini penting untuk menilai akurasi pendekatan estimasi serta kelayakannya dalam pemantauan kualitas udara. Gambar 8 menyajikan perbandingan deret waktu antara konsentrasi PM<sub>2.5</sub> hasil pengamatan dan hasil estimasi selama Agustus - September 2023, yang bertepatan dengan meningkatnya jumlah titik panas dan intensitas kebakaran di Jambi.



**Gambar 8.**

Grafik Perbandingan PM<sub>2.5</sub> Observasi dan Estimasi bulan Agustus - September 2023

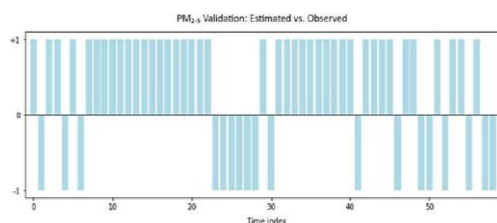
Gambar 9 menggambarkan hubungan antara PM<sub>2.5</sub> hasil estimasi dan hasil pengamatan. Garis oranye ( $Y = X$ ) merepresentasikan kesesuaian sempurna, sementara garis biru menunjukkan hasil regresi. Idealnya, garis regresi seharusnya tumpang tindih dengan garis  $Y = X$ . Namun, dalam penelitian ini, koefisien determinasi ( $R^2 = 0,0216$ ) menunjukkan bahwa hanya sekitar 2,16% dari variansi hasil pengamatan yang dapat dijelaskan oleh model, yang menandakan hubungan yang sangat lemah. Pada konsentrasi rendah ( $< 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), beberapa titik data berada cukup dekat dengan garis identitas, tetapi penyebarannya tetap tidak konsisten. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, model secara sistematis meremehkan nilai yang diamati.



**Gambar 9.**

Grafik Scatter Plot PM<sub>2.5</sub> Estimasi vs Observasi

Gambar 10 menunjukkan validasi kategorikal antara nilai  $PM_{2.5}$  hasil estimasi dan hasil pengamatan. Sumbu vertikal merepresentasikan kesesuaian (+1) atau ketidaksesuaian (-1) dalam klasifikasi selama 59 hari pengamatan. Sebagian besar nilai berada pada +1, yang menunjukkan bahwa model berhasil mengidentifikasi kategori kualitas udara dengan benar pada banyak kasus. Namun, sejumlah nilai -1 mencerminkan adanya salah klasifikasi, khususnya pada September 2023, ketika kabut asap parah akibat kebakaran hutan dan lahan menyebabkan peningkatan konsentrasi  $PM_{2.5}$ . Pada hari-hari tersebut, model sering mengklasifikasikan konsentrasi dalam kategori Sedang, sementara hasil pengamatan menunjukkan kondisi Sangat Tidak Sehat.



**Gambar 10.**

Grafik Validasi Kecocokan Kategori  $PM_{2.5}$  Estimasi terhadap Observasi In-situ

## PEMBAHASAN

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa AOD memiliki potensi yang cukup baik sebagai indikator tidak langsung untuk memperkirakan konsentrasi  $PM_{2.5}$  selama periode kebakaran hutan dan lahan. Korelasi yang relatif kuat antara AOD dan  $PM_{2.5}$ , khususnya pada panjang gelombang pendek (340–354 nm), mengindikasikan bahwa parameter ini sensitif terhadap keberadaan aerosol halus yang

dihasilkan dari pembakaran biomassa. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa AOD dapat digunakan untuk merepresentasikan distribusi  $PM_{2.5}$  di dekat permukaan melalui pendekatan empiris maupun matematis (Chang et al., 2023; Zhu et al., 2024). Penelitian tersebut juga menyebutkan hubungan antara AOD dan  $PM_{2.5}$  juga dipengaruhi oleh karakteristik aerosol, kelembapan relatif, serta kondisi atmosfer seperti tinggi lapisan batas, sehingga akurasi estimasi dapat bervariasi pada kondisi tertentu.

Dalam penelitian ini, performa model estimasi berbasis regresi linear masih memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi polusi ekstrem di permukaan. Hal ini terlihat dari rendahnya nilai koefisien determinasi pada proses validasi serta kecenderungan model untuk meremehkan konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada saat episode kabut asap yang sangat pekat.

Fenomena tersebut kemungkinan berkaitan dengan perbedaan karakteristik pengukuran antara AOD yang merepresentasikan total kolom atmosfer dan pengamatan  $PM_{2.5}$  yang bersifat *near-surface*, serta pengaruh kondisi meteorologi seperti stabilitas atmosfer dan lapisan inversi yang dapat menjebak partikel polutan di dekat permukaan. Oleh karena itu, meskipun pendekatan berbasis AOD dapat digunakan untuk menggambarkan pola spasial dan temporal kualitas udara secara umum, integrasi dengan parameter meteorologi dan pendekatan pemodelan yang lebih kompleks masih diperlukan untuk meningkatkan akurasi estimasi  $PM_{2.5}$ , terutama selama kejadian kabut asap ekstrem.

Penelitian sebelumnya,

menunjukkan bahwa variasi konsentrasi  $PM_{2.5}$  sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi seperti curah hujan, kelembapan relatif, dan kecepatan angin, yang umumnya berkorelasi negatif terhadap konsentrasi  $PM_{2.5}$  karena berperan dalam proses dispersi dan deposisi partikel di atmosfer (Istiana et al., 2024). Selain itu, interaksi antara polutan udara dan kondisi meteorologi dapat membentuk pola hubungan yang kompleks dan bersifat nonlinier, sehingga analisis yang mengintegrasikan parameter kualitas udara dan meteorologi menjadi penting dalam memahami dinamika konsentrasi  $PM_{2.5}$  di suatu wilayah.

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun AOD memiliki hubungan yang cukup kuat dengan  $PM_{2.5}$  pada kondisi tertentu, estimasi berbasis satelit tidak selalu mampu merepresentasikan konsentrasi polutan di permukaan secara akurat, terutama pada kondisi polusi ekstrem. Hal ini terlihat pada kasus 28 September 2023, ketika estimasi  $PM_{2.5}$  dari AOD GEMS jauh lebih rendah dibandingkan pengamatan in-situ. Kondisi tersebut kemungkinan disebabkan oleh distribusi vertikal aerosol yang tidak merata atau akumulasi polutan di lapisan dekat permukaan yang tidak sepenuhnya tercermin dalam nilai AOD kolom atmosfer. Fenomena serupa juga ditemukan oleh Nguyen et al. (2022) yang melaporkan adanya perbedaan pola variasi musiman antara AOD satelit dan konsentrasi  $PM_{2.5}$  di permukaan akibat pengaruh distribusi vertikal aerosol dan dinamika atmosfer lokal

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang

menunjukkan bahwa estimasi  $PM_{2.5}$  berbasis AOD dapat mengalami keterbatasan dalam merepresentasikan variasi konsentrasi di permukaan, sehingga integrasi dengan data pengamatan permukaan atau variabel tambahan diperlukan untuk meningkatkan akurasi pemodelan kualitas udara.

Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa hubungan antara AOD dan  $PM_{2.5}$  dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada kondisi meteorologi, struktur vertikal atmosfer, serta karakteristik aerosol lokal. Selama episode kabut asap akibat kebakaran hutan dan lahan, distribusi vertikal partikel sering kali tidak homogen, sehingga nilai AOD yang merepresentasikan total kolom atmosfer tidak selalu mencerminkan konsentrasi polutan di dekat permukaan. Oleh karena itu, penggabungan data satelit dengan parameter meteorologi, seperti kelembapan relatif, tinggi lapisan batas atmosfer, dan presipitasi, sering direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi estimasi  $PM_{2.5}$  berbasis penginderaan jauh (Wei et al., 2021).

## SIMPULAN

Kebakaran hutan dan lahan pada periode September–Oktober 2023 terbukti memberikan dampak signifikan terhadap penurunan kualitas udara di Provinsi Jambi yang ditandai dengan peningkatan konsentrasi aerosol dan partikulat halus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Aerosol Optical Depth (AOD) berbasis satelit memiliki hubungan yang cukup kuat dengan konsentrasi  $PM_{2.5}$  permukaan, sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengestimasi dan memantau distribusi polusi udara di wilayah yang terbatas

pengamatan berbasis darat. Pendekatan regresi linear mampu merepresentasikan pola temporal dan spasial polusi udara selama episode kebakaran, meskipun masih memiliki keterbatasan pada kondisi kabut asap ekstrem. Secara umum, integrasi data penginderaan jauh dan pengamatan permukaan memberikan potensi yang besar untuk mendukung pemantauan kualitas udara secara lebih luas dan efisien, khususnya di wilayah rawan kebakaran hutan dan lahan. Pengembangan metode estimasi di masa mendatang dapat dilakukan dengan memasukkan faktor meteorologi atau pendekatan pemodelan yang lebih kompleks guna meningkatkan akurasi estimasi PM<sub>2.5</sub> serta mendukung sistem pemantauan dan peringatan dini kualitas udara.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Chang, K. E., Hsiao, T. C., Tsay, S. C., Lin, T. H., Griffith, S. M., Liu, C. Y., & Chou, C. C. K. (2023). Embedded Information of Aerosol Type, Hygroscopicity and Scattering Enhancement Factor Revealed By The Relationship Between PM<sub>2.5</sub> and Aerosol Optical Depth. *Science of The Total Environment*, 867,161471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161471>
- Ehret, A., Turquety, S., George, M., Hadji-Lazaro, J., & Clerbaux, C. (2025). Increase in Carbon Monoxide (CO) and Aerosol Optical Depth (AOD) Observed By Satellites in The Northern Hemisphere Over The Summers of 2008–2023, linked to an increase in wildfires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(12), 6365-6394. <https://doi.org/10.5194/acp-25-6365-2025>
- Hartanto, N., Mauliya, D. J., Al fath'qi, R. R., Julpa, I. S., Fariz, T. R., Haris, A., & Jabbar, A. (2024). Kajian Konsentrasi Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) dan Sulphur Dioxide (SO<sub>2</sub>) di Pulau Kalimantan Menggunakan Google Earth Engine. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 16(1) <https://doi.org/10.33005/envirotek.v16i1.309>.
- Ita (2023, Agustus 29), Indonesia Masuk 6 Negara Paling Berkontribusi pada Polusi Udara Global. *detikNews*. <https://news.detik.com/bbc-world/d-6901572/indonesia-masuk-6-negara-paling-berkontribusi-pada-polusi-udara-global#main>
- Istiana, T., Kurniawan, B., Soekirno, S., Nahas, A., Wihono, A., Nuryanto, D. E., ... & Hakim, M. L. (2023). Causality analysis of Air Quality and Meteorological Parameters for PM<sub>2.5</sub> Characteristics Determination: Evidence from Jakarta. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(9),230014. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230014>
- Karanasiou, A., Alastuey, A., Amato, F., Renzi, M., Stafoggia, M., Tobias, A., ... & Querol, X. (2021). Short-term Health Effects from Outdoor Exposure to Biomass Burning Emissions: A review. *Science of The Total Environment*, 781, 146739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146739>

- Kim, J., Jeong, U., Ahn, M. H., Kim, J. H., Park, R. J., Lee, H., ... & Choi, Y. (2020). New Era of Air Quality Monitoring from Space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(1), E1-E22. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0013.1>
- Kusuma, A. R., Shodiq, F. M., Hazim, M. F., & Laksono, D. P. (2021). Hasil Studi Pola Kebakaran Lahan Gambut melalui Citra Satelit Sentinel-2 dengan Pengimplementasian Machine Learning Metode Random Forest: Kajian Literatur. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 4(2), 81-85. <https://doi.org/10.22146/jgise.60828>
- Luong, N. D., Hieu, B. T., & Hiep, N. H. (2022). Contrasting Seasonal Pattern Between Ground-Based PM<sub>2.5</sub> and MODIS Satellite-Based Aerosol Optical Depth (AOD) At An Urban Site in Hanoi, Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 41971-41982. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16464-z>
- Maulia, S. T., Utami, S., & Ichsan, M. (2023). Dampak Polusi Udara Akibat Kebakaran Hutan dan Lahan Serta Upaya Pengurangannya untuk Mempertahankan Ketahanan Energi. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 29(3), 384-400. <https://doi.org/10.22146/jkn.92761>
- Putra EI, Husni RF. 2021. Hubungan Curah Hujan dan Titik Panas (Hotspot) Kebakaran di Hutan Lindung Gambut (HLG) Londerang, Provinsi Jambi. *Jurnal Silviculture Tropika*. 12(3): 129-134. <https://doi.org/10.29244/j-siltrop.12.3.129-134>
- Syaufina L, Saharjo BH, Nurhayati AD, Putra EI, Wardana. 2022. Respons Tanah terhadap Kebakaran Lahan Gambut : Studi Kasus di Jambi dan Kalimantan Tengah. *Jurnal Silviculture Tropika*. 13(1): 66-71. <https://doi.org/10.29244/J-SILTROP.13.01.66-71>
- Santosa PB, Qirom MA. 2020. Fluktuasi Tinggi Muka Air Lahan Gambut di Desa Tumbang Nusa, Kalimantan Tengah. *Jurnal Galam*. 1(1):27-40. DOI:10.20886/glm.2020.1.1.27-40
- Wei, J., Li, Z., Lyapustin, A., Sun, L., Peng, Y., Xue, W., ... & Cribb, M. (2021). Reconstructing 1-km-Resolution High-Quality PM<sub>2.5</sub> Data Records From 2000 To 2018 in China: Spatiotemporal Variations And Policy Implications. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112136. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112136> Get rights and content
- Zhu, H., Martin, R., van Donkelaar, A., Hammer, M., Li, C., Meng, J., ... & Lyapustin, A. (2024). Global Spatial Variation in the PM<sub>2.5</sub> to AOD Relationship Strongly Influenced by Aerosol Composition. *EGUsphere*, 2024, 1-32. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-950>