

ANALISIS SPASIOTEMPORAL KONSENTRASI NO₂ DI SURABAYA TAHUN 2020-2025 MENGGUNAKAN SENTINEL-5P

PATOTEMPORAL ANALYSIS OF NO₂ CONCENTRATION IN SURABAYA (2020-2025) USING SENTINEL-5P

Taufiq Tri Winardi^{1*}, Riki Audy Bin Ghozail², Rendi Adi Saputra³, Naufal Hilmi Ramadhani⁴,
Risqy Aryasatya Rahardjo⁵, Rozan Syaikh Ash Shiddieq Purnomo⁶, Iqbal Ramadhani Mukhlis⁷

*E-mail: 23082010008@student.upnjatim.ac.id¹, 23082010011@student.upnjatim.ac.id²,
23082010237@student.upnjatim.ac.id³, 23082010209@student.upnjatim.ac.id⁴,
23082010210@student.upnjatim.ac.id⁵, 23082010203@student.upnjatim.ac.id⁶,
iqbal.ramadhani.fasilkom@upnjatim.ac.id⁷

¹²³⁴⁵⁶⁷Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer, UPN “Veteran” Jawa Timur

Abstrak

Peningkatan aktivitas industri dan volume transportasi di Kota Surabaya berpotensi menurunkan kualitas udara secara signifikan, khususnya akibat paparan polutan Nitrogen Dioksida (NO₂). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial dan tren temporal konsentrasi NO₂ di wilayah Surabaya selama periode 2020 hingga 2025. Metode penyelesaian masalah yang digunakan adalah analisis penginderaan jauh memanfaatkan big data citra satelit Sentinel-5P TROPOMI (Offline Level 3) yang diakses dan diolah melalui platform cloud computing Google Earth Engine (GEE). Data diekstraksi dan divisualisasikan menggunakan bahasa pemrograman Python untuk melihat rata-rata konsentrasi polutan secara bulanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi NO₂ tertinggi secara spasial terpusat di kawasan perindustrian dan ruas jalan arteri utama. Secara temporal, ditemukan adanya fluktuasi ekstrem berupa penurunan drastis tingkat emisi pada tahun 2020 hingga 2021 yang bertepatan dengan masa pembatasan mobilitas sosial (pandemi COVID-19), yang kemudian mengalami tren kenaikan kembali secara bertahap hingga tahun 2025 seiring dengan normalisasi aktivitas masyarakat. Kesimpulan utama dari studi ini menegaskan bahwa kebijakan pembatasan aktivitas antropogenik berdampak langsung pada perbaikan kualitas udara, dan integrasi data Sentinel-5P dengan GEE terbukti sangat tangguh untuk memantau dinamika polusi perkotaan jangka panjang.

Kata kunci: *google earth engine, kualitas udara, nitrogen dioksida, sentinel-5p, spasiotemporal.*

Abstract

The increase in industrial activity and transportation volume in Surabaya has the potential to significantly degrade air quality, particularly due to exposure to Nitrogen Dioxide (NO₂) pollutants. This study aims to analyze the spatial distribution and temporal trends of NO₂ concentration in the Surabaya area from 2020 to 2025. The problem-solving method employed is remote sensing analysis utilizing big data from the Sentinel-5P TROPOMI satellite (Offline Level 3), accessed and processed through the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform. Data were extracted and visualized using the Python programming language to observe the monthly average pollutant concentrations. The results indicate that the highest NO₂ concentrations are spatially concentrated in industrial estates and main arterial roads.

Temporally, extreme fluctuations were found, characterized by a drastic decrease in emission levels from 2020 to 2021, which coincided with the period of social mobility restrictions (the COVID-19 pandemic), followed by a gradual upward trend until 2025 as public activities normalized. The main conclusion of this study confirms that policies restricting anthropogenic activities have a direct impact on improving air quality, and the integration of Sentinel-5P data with GEE proves to be highly robust for monitoring long-term urban pollution dynamics.

Keywords: *air quality, google earth engine, nitrogen dioxide, sentinel-5p, spatiotemporal.*

1. PENDAHULUAN

World Health Organization (WHO) menyatakan bahwa pencemaran udara saat ini telah menjadi salah satu isu lingkungan global yang paling kritis, yang mampu menyebabkan hingga tujuh juta kematian setiap tahunnya akibat memburuknya kualitas udara baik di dalam maupun di luar ruangan [1]. Penyebab utama pencemaran udara ini sangat erat kaitannya dengan pembangunan ekonomi, laju urbanisasi, konsumsi energi, serta peningkatan pesat populasi perkotaan dan volume transportasi [3]. Di berbagai kota besar, termasuk Kota Surabaya, tingginya angka kepadatan penduduk yang sebanding dengan peningkatan mobilitas kendaraan bermotor menjadi penyumbang terbesar terhadap akumulasi gas buang polutan di atmosfer [1]. Pencemaran atau polusi udara pada dasarnya merupakan kondisi di mana terdapat zat-zat yang mengubah komposisi alami udara secara signifikan, salah satunya adalah polutan Nitrogen Dioksida (NO₂) [2]. Senyawa NO₂ merupakan polutan primer yang bersumber utama dari sisa pembakaran bahan bakar fosil, khususnya pada sektor transportasi kendaraan bermotor dan aktivitas industri [2].

Memahami dan memantau fluktuasi kualitas udara secara jangka panjang merupakan sebuah tantangan besar [3]. Keterbatasan jumlah Stasiun Pemantau Kualitas Udara Ambians (SPKUA) di darat sering kali menjadi hambatan dalam upaya pemantauan distribusi polutan secara luas, detail, dan kontinu [1]. Oleh karena itu, diperlukan alternatif teknologi yang lebih efisien untuk melakukan pemantauan kualitas udara, yaitu melalui metode penginderaan jauh (*remote sensing*) menggunakan instrumen citra satelit [1]. Salah satu produk penginderaan jauh mutakhir yang dirancang khusus untuk keperluan ini adalah satelit Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) yang diluncurkan oleh *European Space Agency* [2]. Satelit Sentinel-5P ini dilengkapi dengan sensor *Tropospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI) yang secara khusus memiliki misi untuk memantau konstituen utama atmosfer, termasuk polusi udara dan konsentrasi gas NO₂ secara harian dengan resolusi spasial yang sangat memadai [3].

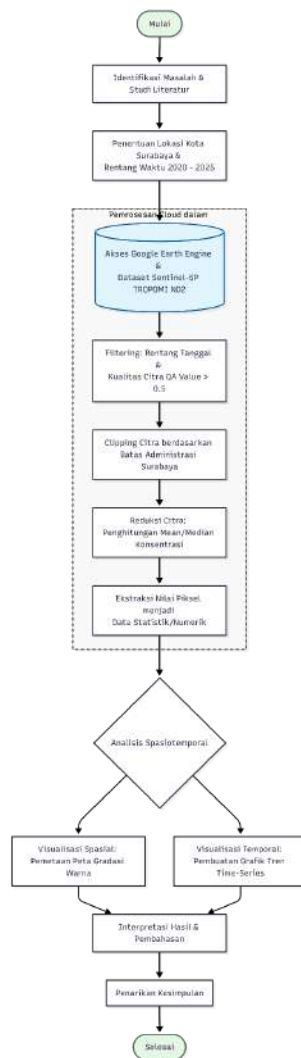
Namun, besarnya *dataset* dari pengolahan data citra satelit berskala besar (*big data*) seringkali menimbulkan keterbatasan dalam pengolahan data apabila hanya mengandalkan perangkat keras lokal [3]. Untuk mengatasi hal tersebut, pemrosesan data geospasial saat ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan teknologi komputasi berbasis *cloud*, salah satunya adalah *Google Earth Engine* (GEE) [2]. Platform GEE memungkinkan proses penautan, penyimpanan, serta pemrograman data geospasial berskala besar secara interaktif, sehingga memberikan kemudahan dalam menganalisis data satelit secara *time series* tanpa hambatan komputasi fisik [3]. Pendekatan efisien ini sangat krusial diimplementasikan mengingat tingginya urgensi penelitian di wilayah Kota Surabaya. Sebagai kota metropolitan terbesar kedua di Indonesia, Surabaya memiliki laju pertumbuhan kendaraan bermotor dan kepadatan aktivitas industri yang masif, menjadikannya kawasan yang sangat rentan terhadap krisis penurunan kualitas udara jangka panjang. Selain itu, penelitian ini difokuskan pada polutan NO₂. Pemilihan NO₂ didasarkan pada dua alasan utama. Pertama, gas ini merupakan tolak ukur yang paling cepat dan akurat untuk melihat tingkat polusi dari asap kendaraan bermotor

sehari-hari. Kedua, NO₂ memiliki dampak yang sangat buruk bagi kesehatan saluran pernapasan masyarakat di daerah perkotaan.

Dinamika aktivitas antropogenik sangat mempengaruhi konsentrasi polutan di udara. Hal ini terbukti dari penelitian terdahulu yang menunjukkan adanya fluktuasi ekstrim emisi gas buang seiring dengan penerapan kebijakan pembatasan mobilitas sosial masyarakat selama masa pandemi COVID-19 (seperti PSBB/PPKM) dan fase normalisasi pasca-pandemi [2]. Berdasarkan fenomena dan ketersediaan teknologi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial dan tren temporal (*spatiotemporal*) konsentrasi polutan NO₂ di wilayah Surabaya selama periode tahun 2020 hingga 2025. Penggunaan data citra satelit Sentinel-5P TROPOMI yang diekstraksi menggunakan platform GEE diharapkan mampu memetakan dampak perubahan tingkat aktivitas masyarakat terhadap kualitas udara, serta membuktikan ketangguhan sistem ini dalam memantau dinamika polusi perkotaan jangka panjang.

2. METODOLOGI

Tahapan metodologi dalam penelitian ini dilaksanakan secara sistematis, diawali dengan tahapan identifikasi masalah dan studi literatur yang komprehensif. Setelah penetapan administrasi Kota Surabaya sebagai lokasi studi dan periode 2020–2025 sebagai rentang waktu pengamatan, tahapan akuisisi dan pengolahan data satelit Sentinel-5P TROPOMI dilakukan sepenuhnya melalui platform Google Earth Engine (GEE). Tahapan pra-pemrosesan di dalam environment komputasi awan tersebut mencakup penyaringan citra berdasarkan QA Value > 0,5 untuk memastikan data bebas dari gangguan tutupan awan, pemotongan (clipping) citra agar sesuai dengan batas wilayah observasi, serta reduksi spasial guna mengekstraksi nilai rata-rata numerik dari konsentrasi NO₂. Kumpulan data tersebut kemudian dikonversi ke dalam dua bentuk analisis spasiotemporal utama, yakni pemetaan distribusi spasial secara visual melalui peta gradasi warna dan pembentukan grafik deret waktu (time-series) secara temporal. Seluruh rangkaian proses ini bermuara pada tahap interpretasi hasil dan pembahasan, yang selanjutnya dievaluasi secara logis untuk merumuskan kesimpulan akhir penelitian.



Gambar 1. Metodologi Penelitian

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini berfokus pada wilayah administrasi Kota Surabaya. Waktu pengamatan dilakukan dalam rentang waktu lima tahun, mulai dari Januari 2020 hingga Desember 2025. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik Surabaya sebagai pusat aktivitas ekonomi yang memiliki dinamika polusi udara yang signifikan, serupa dengan kajian pada kota-kota besar lainnya [1], [2].



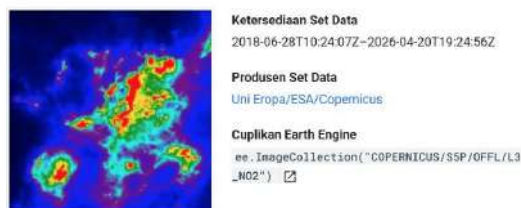
Gambar 2. Studi Area (Kota Surabaya)

2.2 Data dan Sumber Data

Data utama yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-5P TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*). Data ini telah divalidasi memiliki korelasi yang kuat dengan pengukuran di stasiun darat, sehingga sangat andal untuk memantau konsentrasi gas atmosfer [4]. Selain akurasi, instrumen ini menawarkan resolusi spasial tinggi mencapai 5,5 km x 3,5 km yang memungkinkan pemetaan detail di tingkat kota [5].

Pemrosesan data dilakukan melalui platform Google Earth Engine (GEE). Platform berbasis *cloud* ini digunakan karena kemampuannya dalam mengolah dataset *big data* secara efisien tanpa memerlukan komputasi lokal yang berat [2], [3]. Seluruh algoritma pengolahan citra dijalankan menggunakan koleksi dataset COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2 yang tersedia secara *real-time* di GEE [6].

Sentinel-5P OFFL NO2: Offline Nitrogen Dioxide



Gambar 3. Dataset Sentinel-5P dari GEE

2.3 Prosedur Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan menggunakan platform *Google Earth Engine* dengan bahasa pemrograman Python. Tahapan sistematis pengolahan data meliputi:

- **Akses Data dan Filtering:** Data diakses melalui API GEE dan difilter berdasarkan batas wilayah Surabaya. Untuk menjamin kualitas data, digunakan filter `qa_value` di atas 0,5 untuk meminimalisir gangguan awan dan kesalahan sensor [5], [6].

- **Reduksi Spasial:** Menghitung nilai rata-rata (*mean*) dari seluruh piksel citra dalam rentang waktu yang ditentukan untuk menghasilkan peta sebaran yang representatif [3], [5].
- **Visualisasi dan Ekstraksi:** Hasil pemrosesan divisualisasikan dalam peta gradasi warna untuk analisis spasial dan diekstraksi menjadi grafik deret waktu (*time-series*) untuk analisis temporal [1], [6].

2.4 Analisis Spasiotemporal

Analisis dilakukan dengan membandingkan pola sebaran NO₂ secara spasial (lokasi) dan temporal (waktu). Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk melihat dampak perubahan aktivitas antropogenik, seperti kebijakan mobilitas dan operasional industri, terhadap kualitas udara di Kota Surabaya sepanjang tahun 2020 hingga 2025 [1], [2].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

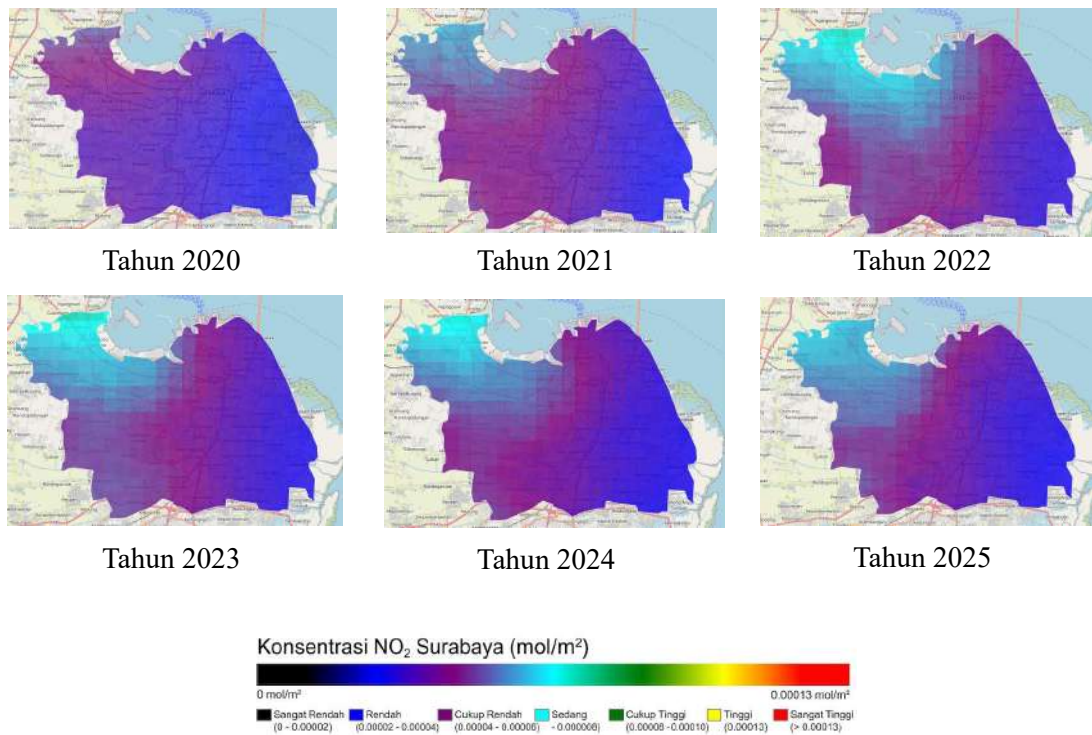
3.1 Analisis Spasial Sebaran NO₂ Kota Surabaya (2020–2025)

Pada fase awal pengamatan, konsentrasi puncak NO₂ tercatat pada level terendah, yakni 0, 000057 mol/m^2 di tahun 2020 akibat pembatasan mobilitas pandemi COVID-19. Memasuki tahun 2021, seiring pelonggaran aktivitas secara bertahap, nilai puncak konsentrasi mulai mengalami kenaikan menjadi 0, 000065 mol/m^2 . Secara visual, sebaran polusi tertinggi (merah pekat) pada kedua tahun tersebut berpusat di lokasi tipikal, yakni kawasan pusat Kota Surabaya dan area industri.

Lonjakan polusi yang signifikan terjadi pada masa pemulihan pasca-pandemi, di mana tahun 2022 menjadi titik puncak tertinggi selama periode penelitian dengan nilai konsentrasi mencapai 0, 000079 mol/m^2 . Tren ini relatif stabil pada level tinggi di tahun 2023 dengan sedikit penurunan pada angka 0, 000077 mol/m^2 . Pada periode ini, intensitas warna merah pekat semakin mempertegas bahwa pusat kota dan kawasan industri merupakan sumber emisi utama yang tidak terhindarkan akibat pulihnya volume kendaraan.

Memasuki fase normalisasi, tren konsentrasi NO₂ menunjukkan pola penurunan yang landai secara perlahan, dengan nilai puncak sebesar 0, 000075 mol/m^2 pada tahun 2024 dan berlanjut ke angka 0, 000070 mol/m^2 di tahun 2025. Meskipun terdapat tren penurunan dari titik puncaknya (2022), peta sebaran spasial mengonfirmasi bahwa akumulasi polusi tertinggi yang ditandai dengan warna merah pekat masih sangat konsisten mengendap di kawasan pusat kota dan wilayah industri.

Berdasarkan sintesis peta dan statistik, *hotspot* polusi Surabaya terbagi pada dua tipologi utama. Pertama, area pusat kota (Tegalsari, Genteng, dan Bubutan) yang konsisten merah akibat kepadatan lalu lintas dan komersial. Kedua, area industri dan pelabuhan (Margomulyo/Tandes dan Tanjung Perak/Pabean Cantikan) yang menjadi titik panas akibat aktivitas kendaraan berat logistik. Secara keseluruhan, tren tahunan menunjukkan kenaikan linier dari masa pandemi (2020) menuju puncaknya di 2022-2023, yang merepresentasikan secara akurat kembalinya mobilitas warga dan aktivitas ekonomi ke tingkat normal.



Gambar 4. Sebaran Konsentrasi NO₂ di Kota Surabaya

Secara kuantitatif, fluktuasi polusi udara di Kota Surabaya terekam jelas pada data statistik deskriptif konsentrasi NO₂ (Tabel 1) di bawah. Nilai rata-rata (*mean*) terendah terjadi pada fase Pandemi (PSBB) tahun 2020 sebesar 0,000051 mol/m². Seiring berjalannya transisi kebijakan menuju PPKM di tahun 2021, konsentrasi rata-rata mulai merangkak naik. Lonjakan paling drastis terkonfirmasi pada fase Transisi/Recovery (2022), di mana nilai rata-rata mencapai puncaknya di angka 0,000067 mol/m² dengan rekor nilai maksimum absolut menyentuh 0,000079 mol/m².

Memasuki rentang tahun 2023 hingga 2025 (fase Normalisasi hingga Pasca-Pandemi), nilai rata-rata tahunan menunjukkan tren penurunan secara bertahap menuju angka 0,000059 mol/m² pada kondisi terkini. Meskipun berangsur turun dari titik puncaknya di tahun 2022, konsentrasi ambang bawah (minimum) maupun rata-rata pada tahun 2025 ini tetap secara konsisten berada di atas ambang batas saat masa awal pandemi. Fluktuasi statistik ini secara empiris memvalidasi temuan spasial sebelumnya, membuktikan bahwa intervensi pembatasan mobilitas berdampak langsung secara signifikan terhadap reduksi emisi NO₂, sementara reaktivasi ekonomi memicu lonjakan polutan secara masif.

Tabel 1. Nilai Statistik Konsentrasi NO₂ Kota Surabaya Tahun 2020 – 2025

Tahun	Rata-Rata (mol/m ²)	Konsentrasi Puncak (mol/m ²)	Kategori
2020	0.0000374	0.0000565	Sedang
2021	0.0000453	0.0000651	Sedang

2022	0.0000528	0.0000789	Sedang
2023	0.0000509	0.0000772	Sedang
2024	0.0000480	0.0000748	Sedang
2025	0.0000482	0.0000699	Sedang

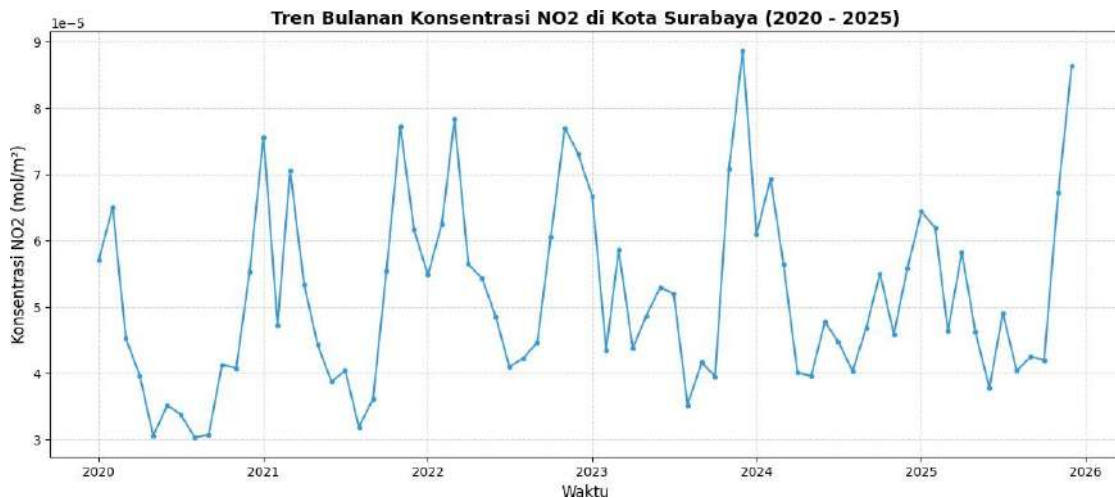
Tabel 2. Indikator Kategori

Kategori	Rentang Nilai (mol/m ²)
Sangat Tinggi	> 0.00013
Tinggi	0.00009 - 0.00013
Sedang	0.00006 - 0.00009
Rendah	0.00002 - 0.00006
Sangat Rendah	0.00000 - 0.00002

Pada Gambar 5 di bawah, menyajikan fluktuasi bulanan konsentrasi NO₂ yang jauh lebih dinamis dibandingkan rata-rata tahunan. Grafik tersebut menunjukkan pola osilasi yang jelas, di mana terdapat siklus puncak (*peak*) dan lembah (*trough*) yang berulang setiap tahunnya. Pada periode 2020 hingga pertengahan 2021, grafik bergerak pada baseline yang rendah dengan lembah terdalam terjadi di kuartal kedua tahun 2020, yang bertepatan dengan pemberlakuan PSBB total pertama di Surabaya. Hal ini mengonfirmasi bahwa pembatasan mobilitas secara mendadak memberikan jeda bagi atmosfer untuk mereduksi beban polutan NO₂ secara signifikan.

Memasuki tahun 2022, grafik menunjukkan anomali berupa lonjakan tajam (*rebound effect*) yang mencapai titik tertinggi di sepanjang periode pengamatan. Kenaikan curam ini merepresentasikan percepatan aktivitas ekonomi dan pemulihan mobilitas yang masif setelah periode restriksi panjang. Berbeda dengan pola tahun-tahun sebelumnya, puncak polusi di tahun 2022 menunjukkan durasi yang lebih lama sebelum akhirnya melandai, menandakan intensitas pembakaran bahan bakar fosil dari sektor transportasi dan industri yang kembali beroperasi penuh secara simultan.

Pada rentang waktu 2023 hingga akhir 2025, grafik menunjukkan karakteristik "normalitas baru" dengan pola fluktuasi yang lebih stabil namun tetap berada pada level konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan masa pandemi. Terdapat pola siklus musiman yang konsisten di mana konsentrasi NO₂ cenderung menurun di bulan-bulan tertentu kemungkinan berkorelasi dengan peningkatan curah hujan (pencucian polutan/ *wet deposition*) atau periode libur panjang yang mereduksi volume kendaraan di jalur protokol. Secara keseluruhan, analisis temporal ini membuktikan bahwa meskipun terdapat tren penurunan perlahan pasca-2022, kualitas udara di Surabaya belum kembali ke level rendah seperti pada awal tahun 2020, menunjukkan adanya akumulasi emisi antropogenik yang menetap seiring dengan pertumbuhan kota.



Gambar 5. Rata - Rata Bulanan Konsentrasi NO₂ di Kota Surabaya (2020-2025)

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis spasiotemporal konsentrasi NO₂ di Kota Surabaya selama periode 2020–2025, dapat ditarik kesimpulan bahwa dinamika kualitas udara memiliki keterkaitan logis yang sangat kuat dengan fluktuasi aktivitas antropogenik. Sebagai jawaban atas permasalahan yang diajukan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kebijakan pembatasan mobilitas pada masa pandemi (2020) berhasil menekan konsentrasi rata-rata ke level terendah sebesar 0,000051 mol/m². Sebaliknya, fase pemulihan ekonomi pada tahun 2022 memicu lonjakan konsentrasi hingga mencapai titik puncak dengan nilai rata-rata 0,000067 mol/m². Secara spasial, wilayah pusat kota yang mencakup Kecamatan Tegalsari dan Genteng, serta kawasan industri di wilayah Tandes dan Pabean Cantikan, teridentifikasi secara konsisten sebagai titik panas (hotspot) polusi utama. Sebagai kesimpulan tambahan, ditemukan fakta bahwa meskipun terdapat tren penurunan setelah tahun 2022, level polusi pada fase normalisasi (2023–2025) tetap berada di atas baseline masa pandemi, yang mengindikasikan adanya beban emisi menetap seiring dengan kembalinya aktivitas perkotaan secara penuh.

Bertitik tolak dari temuan tersebut, disarankan bagi otoritas terkait untuk merumuskan kebijakan mitigasi emisi yang terfokus pada zona-zona merah yang telah teridentifikasi, khususnya melalui rekayasa lalu lintas kendaraan berat di jalur logistik dan optimalisasi transportasi massal di pusat kegiatan bisnis. Secara akademis, mengingat penelitian ini sepenuhnya berbasis pada data penginderaan jauh, disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan uji validasi silang dengan data observasi stasiun pemantau darat guna memperoleh tingkat akurasi yang lebih absolut. Selain itu, integrasi variabel meteorologi seperti arah angin dan intensitas curah hujan sangat direkomendasikan untuk memperdalam analisis mengenai mekanisme dispersi polutan secara horizontal di lapisan atmosfer Kota Surabaya.

5. DAFTAR RUJUKAN

- [1] Ramadhan, E., Hadi, F., & Yusuf, M. A. (2024). ANALISIS SPASIO-TEMPORAL PENGARUH CURAH HUJAN TERHADAP POLUSI UDARA KARBON MONOKSIDA DI KOTA BANDUNG TAHUN 2023: PENDEKATAN BERBASIS DATA SATELIT. *Jurnal Reka Lingkungan*, 12(3), 269-282.

- [2] Togatorop, J. P. E., Perdana, A. R., Firdaush, R. B., Wulandari, I. P., & Saputra, A. H. (2023). Analisis Dampak Pemberlakuan PSBB Total Pertama terhadap Kualitas Udara NO₂ dan CO di DKI Jakarta Menggunakan Citra Sentinel-5P. *Jurnal Aplikasi Meteorologi*, 2(1), 33-44.
- [3] Suryoprayogo, H. (2022). Spatio-Temporal analysis polutan karbon monoksida (co) jakarta selama pandemi menggunakan sentinel-5p tropomi. *Journal of Informatics and Communication Technology (JICT)*, 4(2), 47-54.
- [4] C. G. et al., "SENTINEL-5P NO₂ DATA: CROSS-VALIDATION AND COMPARISON WITH GROUND MEASUREMENTS," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLIII-B3-2022, pp. 455-461, 2022.
- [5] S. F. Othman et al., "Spatio-Temporal Analysis of NO₂ Concentration in Binh Duong Province, Vietnam Using Sentinel-5P Imageries and Google Earth Engine," *Tropical Geospatial Information Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 63-71, 2023.
- [6] A. K. et al., "Spatiotemporal Analysis of NO₂ Production Using TROPOMI Time-Series Images and Google Earth Engine," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 1725, pp. 1-22, 2022.