Jurnal Lingkungan Nusantara (JLN)
Vol. 3, No. 1, Februari 2026, Hal. 12–22
e-ISSN: xxxx-xxxx

Utilization of Sentinel Imagery Based on the Earth Engine Data Catalog to Identify Air Pollution in Palangka Raya City

Pemanfaatan Citra Sentinel Berbasis Earth Engine Data Catalog untuk Identifikasi Pencemaran Udara di Kota Palangka Raya

Akhmad Afriyan Noor[1*]
[1]Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangkaraya, Palangka Raya, Indonesia
*surel: aafriyann@gmail.com

ABSTRACT

Palangka Raya City has few ground air-quality stations, yet it is exposed to urban emissions and land and peat fires. This study mapped the distribution of nitrogen dioxide (NO_2), carbon monoxide (CO), and sulfur dioxide (SO_2) using Sentinel-5P/TROPOMI Near Real-Time Level-3 data from the Google Earth Engine (GEE) Data Catalog for January–December 2025. Data were filtered by city boundary, period, and cloud fraction (< 20%), composited into annual mean, minimum, and maximum images, reduced regionally at 1,000 m, and exported as GeoTIFF for GIS verification. NO_2 column density was low and uniform; CO was relatively higher over the urban core and open land near anthropogenic activity, decreasing toward the periphery; SO_2 appeared as localized spots in peripheral and open areas. Sentinel-5P in GEE is effective for regional early warning but does not replace in situ measurements and should be combined with ground and meteorological data.

***Keywords*:**
Air pollution,
Sentinel-5P,
Google Earth Engine,
Remote sensing,
Palangka Raya
Received: February 2026
Reviewed: February 2026
Published: February 2026

ABSTRAK

Pemantauan pencemaran udara di Kota Palangka Raya terkendala sedikitnya stasiun darat, padahal kota ini terpapar emisi perkotaan serta kebakaran lahan dan gambut. Penelitian ini memetakan sebaran nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), dan sulfur dioksida (SO_2) dengan data Sentinel-5P/TROPOMI *Near Real-Time Level-3* dari Earth Engine Data Catalog pada Google Earth Engine (GEE) periode Januari–Desember 2025. Data difilter menurut batas kota, periode, dan fraksi awan (< 20%), dikompositkan menjadi citra rata-rata, minimum, dan maksimum tahunan, direduksi secara regional pada skala 1.000 m, dan diekspor sebagai GeoTIFF untuk verifikasi SIG. Kerapatan kolom NO_2 rendah dan merata; CO relatif lebih tinggi di pusat kota dan lahan terbuka dekat aktivitas antropogenik serta menurun ke pinggiran; SO_2 berupa titik lokal di pinggiran dan lahan terbuka. Sentinel-5P dalam GEE efektif untuk pemantauan awal regional, tetapi tidak menggantikan pengukuran *in situ* dan perlu dipadukan dengan data darat dan meteorologi.

Kata Kunci:
Pencemaran udara,
Sentinel-5P,
Google Earth Engine,
Penginderaan jauh,
Palangka Raya
Diterima: Februari 2026
Direview: Februari 2026
Dipublikasi: Februari 2026

© 2026 The Authors. Published by Researches and Community Services JANTOS CV. This is Open Access article under the CC-BY-SA License (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan utama di wilayah perkotaan karena berdampak langsung terhadap kesehatan manusia, ekosistem, dan kualitas hidup masyarakat. Polutan gas seperti nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), dan sulfur dioksida (SO_2) dihasilkan terutama oleh pembakaran bahan bakar fosil pada kendaraan bermotor, pembangkit energi, industri, serta pembakaran biomassa. Paparan NO_2 berkaitan dengan gangguan saluran pernapasan, CO mengurangi kemampuan darah mengangkut oksigen, sedangkan SO_2 bersifat iritan dan berperan dalam pembentukan hujan asam [1], [2]. Di Indonesia, pengendalian mutu udara ambien diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 yang menetapkan baku mutu udara ambien nasional untuk parameter-parameter tersebut [3].

Kota Palangka Raya, ibu kota Provinsi Kalimantan Tengah, memiliki karakteristik yang khas karena sebagian besar wilayahnya berupa lahan gambut, lahan terbuka, dan kawasan hutan yang berbatasan langsung dengan permukiman. Selain emisi dari aktivitas transportasi dan domestik di pusat kota, kualitas udara di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh kebakaran lahan dan gambut, terutama pada musim kemarau. Kebakaran gambut di Kalimantan Tengah telah lama diketahui melepaskan karbon dan polutan dalam jumlah sangat besar [4], dan peristiwa kebakaran tahun 2015 menurunkan kualitas udara secara drastis dalam skala regional [5], [6]. Kondisi ini menuntut sistem pemantauan kualitas udara yang mampu mencakup wilayah yang luas secara berkelanjutan.

Pemantauan kualitas udara konvensional berbasis stasiun darat memberikan data yang akurat, tetapi cakupan spasialnya terbatas pada titik lokasi stasiun serta memerlukan biaya pengadaan dan operasional yang tinggi. Penginderaan jauh satelit memberikan alternatif untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Setelah keberhasilan instrumen OMI [7], satelit Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) dari program Copernicus membawa instrumen TROPOMI (*TROPOspheric Monitoring Instrument*) yang dirancang untuk memantau komposisi atmosfer, termasuk NO_2, CO, SO_2, ozon, dan aerosol, dengan cakupan global harian dan resolusi spasial yang lebih tinggi [8]. Kemampuan TROPOMI dalam memetakan NO_2 hingga tingkat sumber emisi lokal [9], [10], mengukur CO secara konsisten [11], dan mendeteksi SO_2 [12] telah dibuktikan dalam berbagai penelitian, termasuk untuk memantau perubahan emisi akibat pembatasan aktivitas manusia [13].

Pengolahan data Sentinel-5P dalam jumlah besar kini dapat dilakukan secara efisien melalui Google Earth Engine (GEE), yaitu platform komputasi awan yang menyediakan arsip data geospasial berskala petabita beserta antarmuka pemrograman untuk analisis spasial dan temporal [14]. Data Sentinel-5P tersedia dalam Earth Engine Data Catalog sebagai produk Level-3 yang telah digrid sehingga dapat langsung dianalisis tanpa pengunduhan dan pra-pemrosesan yang rumit [15]. Pemanfaatan GEE untuk mengkaji konsentrasi NO_2 dan SO_2 di Pulau Kalimantan telah dilakukan oleh Hartanto dkk. [16], namun kajian yang secara khusus memetakan sebaran NO_2, CO, dan SO_2 pada skala Kota Palangka Raya masih terbatas.

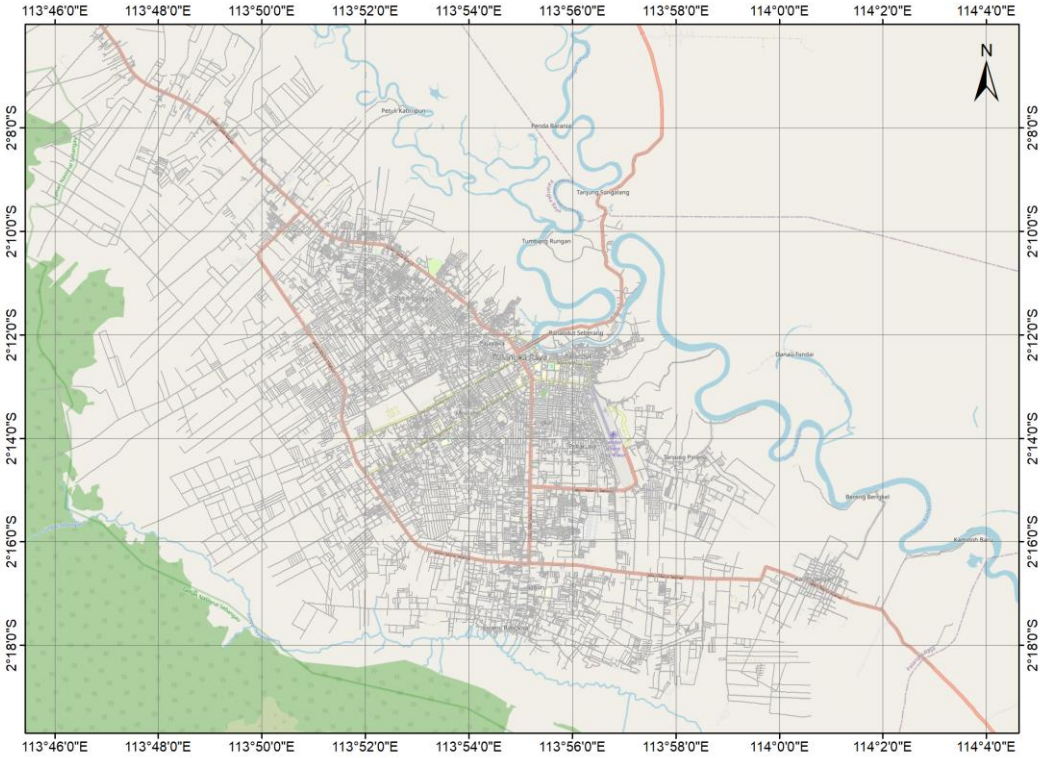
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memanfaatkan citra Sentinel-5P berbasis Earth Engine Data Catalog untuk memantau kondisi pencemaran udara di Kota Palangka Raya; (2) mengidentifikasi dan memetakan pola sebaran spasial NO_2, CO, dan SO_2 selama periode Januari–Desember 2025; serta (3) merumuskan rekomendasi pemanfaatan data Sentinel-5P dalam pengelolaan kualitas udara. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pemantauan awal (*early warning*) pencemaran udara dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data spasial.

METODOLOGI

Lokasi dan Periode Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kota Palangka Raya, Provinsi Kalimantan Tengah, dengan pusat wilayah studi sekitar 2,2° LS dan 113,9° BT (Gambar 1). Wilayah studi mencakup kawasan perkotaan, permukiman, serta lahan terbuka dan pinggiran hutan yang rentan terhadap pembakaran. Batas wilayah didefinisikan sebagai geometri poligon pada GEE. Periode analisis ditetapkan dari 1

Januari hingga 31 Desember 2025 untuk merepresentasikan kondisi satu tahun penuh yang mencakup musim hujan dan musim kemarau.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian Kota Palangka Raya

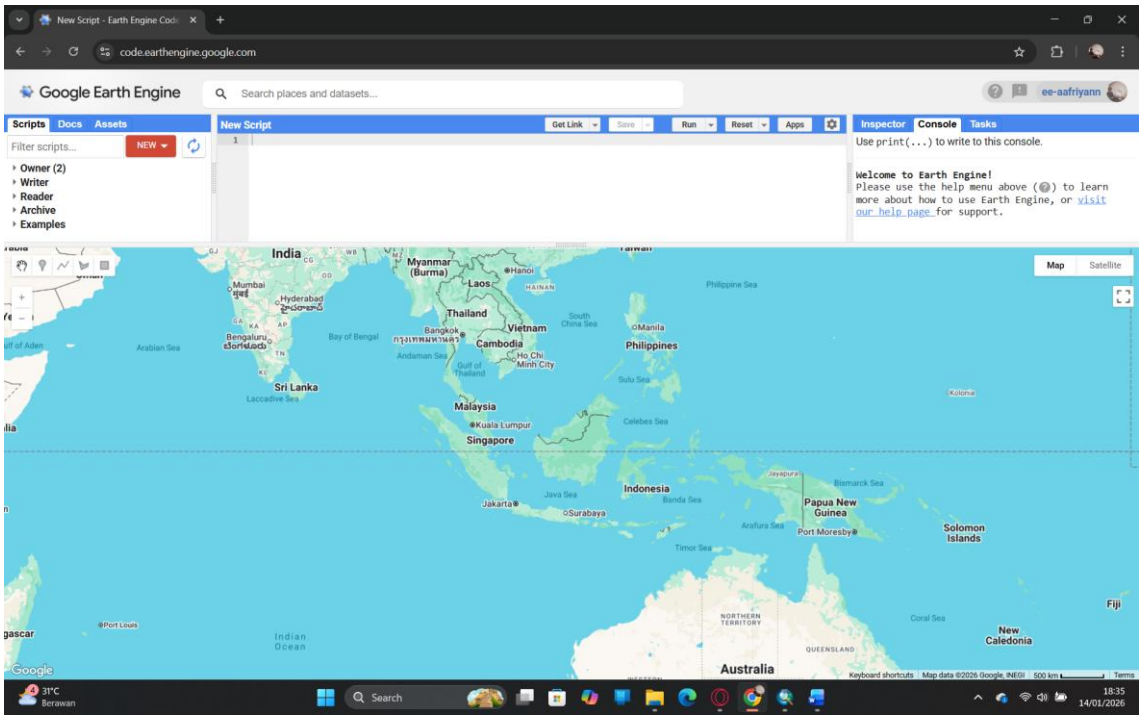
Alat dan Bahan

Bahan utama penelitian adalah data satelit Sentinel-5P NRTI L3 dari Earth Engine Data Catalog dengan spesifikasi pada Tabel 1. Pengolahan dilakukan pada GEE Code Editor menggunakan bahasa JavaScript (Gambar 2). Perangkat pendukung berupa komputer dengan koneksi internet, layanan Google Drive untuk penyimpanan hasil ekspor, dan aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) desktop untuk tata letak peta dan verifikasi visual.

Tabel 1. Spesifikasi data Sentinel-5P yang digunakan

Parameter	Koleksi Earth Engine	Band	Satuan	Rentang visualisasi
NO_2	COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2	NO2_column_number_density	mol/m²	0–0,0002
CO	COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO	CO_column_number_density	mol/m²	0–0,05
SO_2	COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2	SO2_column_number_density	mol/m²	0–0,0004

Sumber: Earth Engine Data Catalog [15] dan pengolahan data, 2025

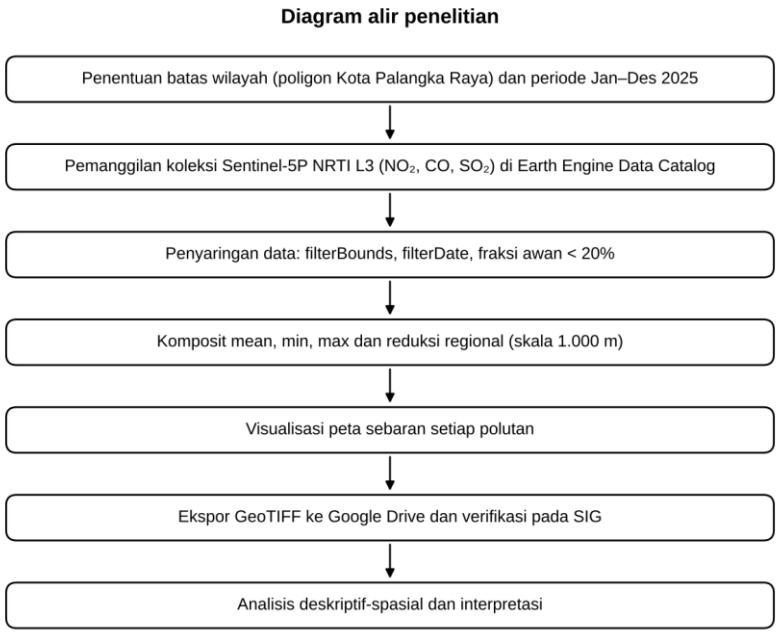


Gambar 2. Antarmuka Google Earth Engine Code Editor yang digunakan dalam pengolahan data

Prosedur Penelitian

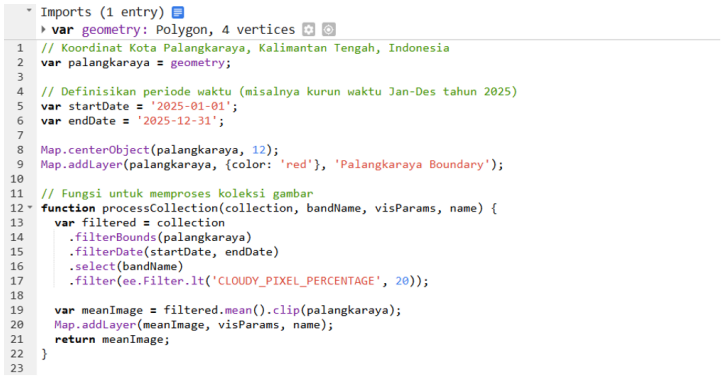
Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 3 dan dilaksanakan secara berurutan sebagai berikut:

1. **Penentuan wilayah dan periode studi.** Geometri poligon batas Kota Palangka Raya dan rentang waktu 1 Januari–31 Desember 2025 didefinisikan pada skrip GEE.
2. **Pemanggilan dan penyaringan data.** Koleksi Sentinel-5P NRTI L3 untuk ketiga parameter dipanggil, lalu disaring menggunakan fungsi *filterBounds* (batas wilayah), *filterDate* (periode penelitian), dan penyaringan piksel dengan fraksi awan lebih dari 20%.
3. **Komposit dan reduksi statistik.** Fungsi *processCollection* digunakan untuk menghasilkan citra komposit rata-rata (*mean*), minimum, dan maksimum. Statistik wilayah dihitung dengan *ee.Reducer.mean/min/max* melalui reduksi regional pada skala 1.000 m dengan batas *maxPixels* 1×10^9.
4. **Visualisasi.** Citra rata-rata tahunan divisualisasikan dalam peta tematik dengan rentang nilai pada Tabel 1 serta palet warna bergradasi dari nilai rendah ke tinggi.
5. **Ekspor dan verifikasi.** Citra hasil diekspor ke Google Drive menggunakan fungsi *Export.image.toDrive* dalam format GeoTIFF, kemudian ditata letak dan diverifikasi pada aplikasi SIG terhadap kondisi tutupan lahan.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Potongan skrip GEE yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Skrip terdiri atas definisi wilayah dan periode, fungsi pemrosesan koleksi, fungsi statistik, pemanggilan ketiga koleksi polutan, serta perintah ekspor citra.



```
Imports (1 entry)
  var geometry: Polygon, 4 vertices
// Koordinat Kota Palangkaraya, Kalimantan Tengah, Indonesia
var palangkaraya = geometry;

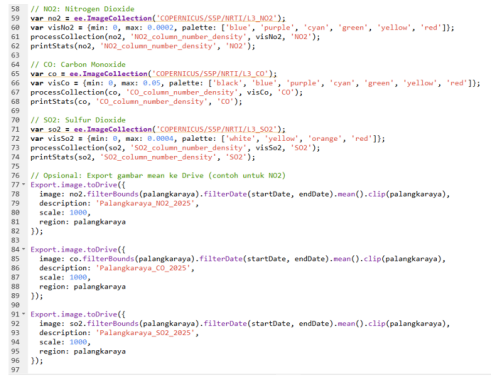
// Definisikan periode waktu (misalnya kurun waktu Jan-Des tahun 2025)
var startDate = '2025-01-01';
var endDate = '2025-12-31';

Map.centerObject(palangkaraya, 12);
Map.addLayer(palangkaraya, {color: 'red'}, 'Palangkaraya Boundary');

// Fungsi untuk memproses koleksi gambar
function processCollection(collection, bandName, visParams, name) {
  var filtered = collection
    .filterBounds(palangkaraya)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .select(bandName)
    .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20));

  var meanImage = filtered.mean().clip(palangkaraya);
  Map.addLayer(meanImage, visParams, name);
  return meanImage;
}
```

(a)



```
// NO2: Nitrogen Dioxide
var no2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2');
var visNo2 = {min: 0, max: 0.0002, palette: ['blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']};
processCollection(no2, 'NO2_column_number_density', visNo2, 'NO2');
printStats(no2, 'NO2_column_number_density', 'NO2');

// CO: Carbon Monoxide
var co = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO');
var visCo = {min: 0, max: 0.05, palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']};
processCollection(co, 'CO_column_number_density', visCo, 'CO');
printStats(co, 'CO_column_number_density', 'CO');

// SO2: Sulfur Dioxide
var so2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2');
var visSo2 = {min: 0, max: 0.0004, palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red']};
processCollection(so2, 'SO2_column_number_density', visSo2, 'SO2');
printStats(so2, 'SO2_column_number_density', 'SO2');

// Opsional: Export gambar mean ke Drive (contoh untuk NO2)
Export.image.toDrive({
  image: no2.filterBounds(palangkaraya).filterDate(startDate, endDate).mean().clip(palangkaraya),
  description: 'Palangkaraya_NO2_2025',
  scale: 1000,
  region: palangkaraya
});

Export.image.toDrive({
  image: co.filterBounds(palangkaraya).filterDate(startDate, endDate).mean().clip(palangkaraya),
  description: 'Palangkaraya_CO_2025',
  scale: 1000,
  region: palangkaraya
});

Export.image.toDrive({
  image: so2.filterBounds(palangkaraya).filterDate(startDate, endDate).mean().clip(palangkaraya),
  description: 'Palangkaraya_SO2_2025',
  scale: 1000,
  region: palangkaraya
});
```

(b)

Gambar 4. Skrip GEE: (a) definisi wilayah, periode, dan fungsi *processCollection*; (b) pemanggilan koleksi NO_2, CO, SO_2 dan ekspor citra

```
// Fungsi untuk print statistik yang diperbaiki (hindari combine error)
function printStats(collection, bandName, name) {
  var filtered = collection.filterBounds(palangkaraya)
                           .filterDate(startDate, endDate)
                           .select(bandName);

  var meanImage = filtered.mean();
  var minImage = filtered.min();
  var maxImage = filtered.max();

  var stats = ee.Dictionary({
    'mean': meanImage.reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      geometry: palangkaraya,
      scale: 1000,
      maxPixels: 1e9
    }),
    'min': minImage.reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.min(),
      geometry: palangkaraya,
      scale: 1000,
      maxPixels: 1e9
    }),
    'max': maxImage.reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.max(),
      geometry: palangkaraya,
      scale: 1000,
      maxPixels: 1e9
    })
  });

  print(name + ' Statistics:', stats);
}

```

Gambar 5. Fungsi statistik wilayah (*mean*, *min*, *max*) dengan reduksi regional skala 1.000 m

Analisis Data

Analisis dilakukan secara deskriptif-spasial dengan membandingkan pola sebaran nilai kerapatan kolom tiap polutan antarbagian wilayah kota, yaitu pusat kota, permukiman, pinggiran kota, dan lahan terbuka. Area dengan nilai relatif tinggi diinterpretasikan berdasarkan penggunaan lahan dan sumber emisi yang mungkin berkontribusi. Data Sentinel-5P menyatakan kerapatan kolom atmosfer (mol/m^2), bukan konsentrasi di permukaan tanah (µg/m^3). Oleh karena itu, hasilnya tidak dibandingkan secara langsung dengan baku mutu udara ambien pada Tabel 2, melainkan digunakan untuk mengidentifikasi pola spasial dan area prioritas pemantauan.

Tabel 2. Baku mutu udara ambien nasional dan pedoman WHO untuk parameter yang dikaji

Parameter	Waktu pengukuran	PP 22/2021 (µg/m^3)	WHO 2021 (µg/m^3)
NO_2	1 jam	200	–
	24 jam	65	25
	1 tahun	50	10
CO	1 jam	10.000	–
	8 jam	4.000	–
	24 jam	–	4.000
SO_2	1 jam	150	–
	24 jam	75	40
	1 tahun	45	–

Sumber: PP Nomor 22 Tahun 2021 [3] dan WHO [2]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data Sentinel-5P periode Januari–Desember 2025 menghasilkan peta sebaran rata-rata tahunan untuk ketiga parameter. Ketiga polutan menunjukkan karakteristik sebaran yang berbeda sebagaimana dirangkum pada Tabel 3, dan uraiannya disajikan pada subbab berikut.

Tabel 3. Ringkasan karakteristik sebaran polutan di Kota Palangka Raya tahun 2025

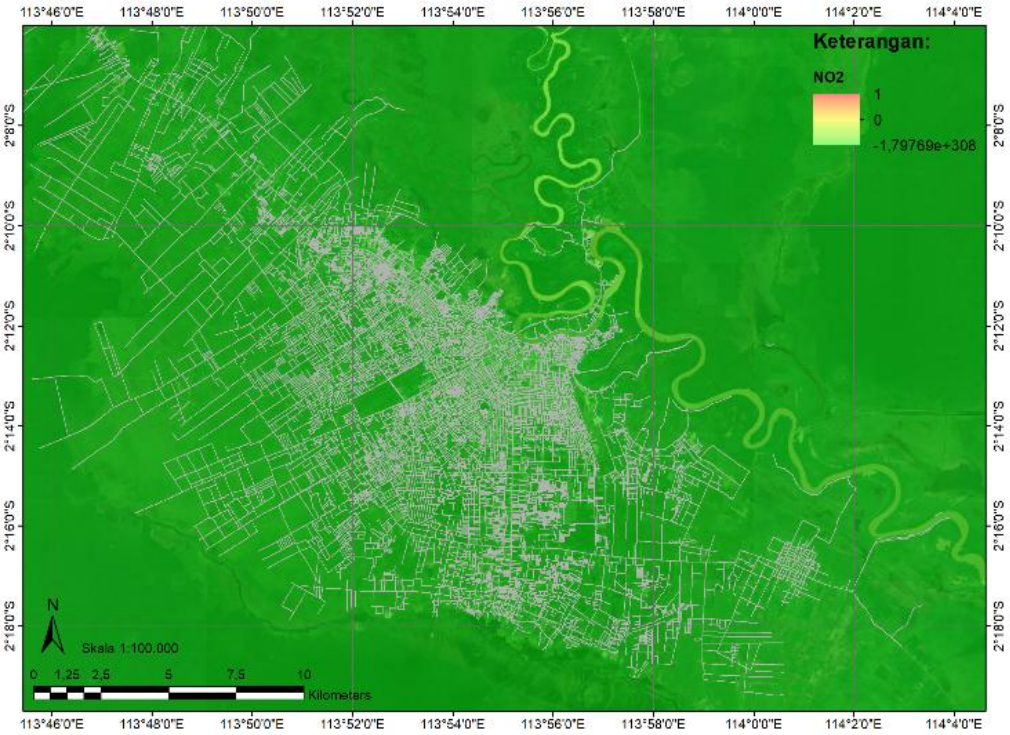
Parameter	Pola sebaran	Area relatif tinggi	Dugaan sumber dominan
NO_2	Rendah dan relatif merata	Tidak ada akumulasi menonjol	Kendaraan bermotor dan aktivitas domestik (intensitas rendah)

Parameter	Pola sebaran	Area relatif tinggi	Dugaan sumber dominan
CO	Bervariasi; menurun ke arah pinggiran	Pusat kota dan lahan terbuka dekat aktivitas antropogenik	Pembakaran tidak sempurna kendaraan dan pembakaran biomassa/gambut
SO_2	Lokal, berupa titik-titik	Pinggiran kota dan lahan terbuka	Sumber skala kecil: pembakaran bahan bakar, sampah, aktivitas pertanian

Sumber: Hasil analisis, 2025

Sebaran Nitrogen Dioksida (NO_2)

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa kerapatan kolom NO_2 di Kota Palangka Raya relatif rendah dan tersebar merata (Gambar 6). Tidak teridentifikasi akumulasi NO_2 yang menonjol pada wilayah tertentu, baik di kawasan perkotaan maupun lahan terbuka. NO_2 merupakan indikator utama emisi pembakaran bersuhu tinggi, terutama dari kendaraan bermotor, pembangkit listrik, dan industri [9]. Rendahnya nilai NO_2 mengindikasikan bahwa kontribusi emisi dari sektor transportasi dan industri di Palangka Raya masih terbatas, sesuai dengan karakteristik kota berintensitas lalu lintas sedang tanpa kawasan industri berat. Selain itu, NO_2 memiliki masa hidup yang relatif singkat di atmosfer sehingga mudah terdispersi dan terurai pada kondisi tropis dengan radiasi matahari yang tinggi.

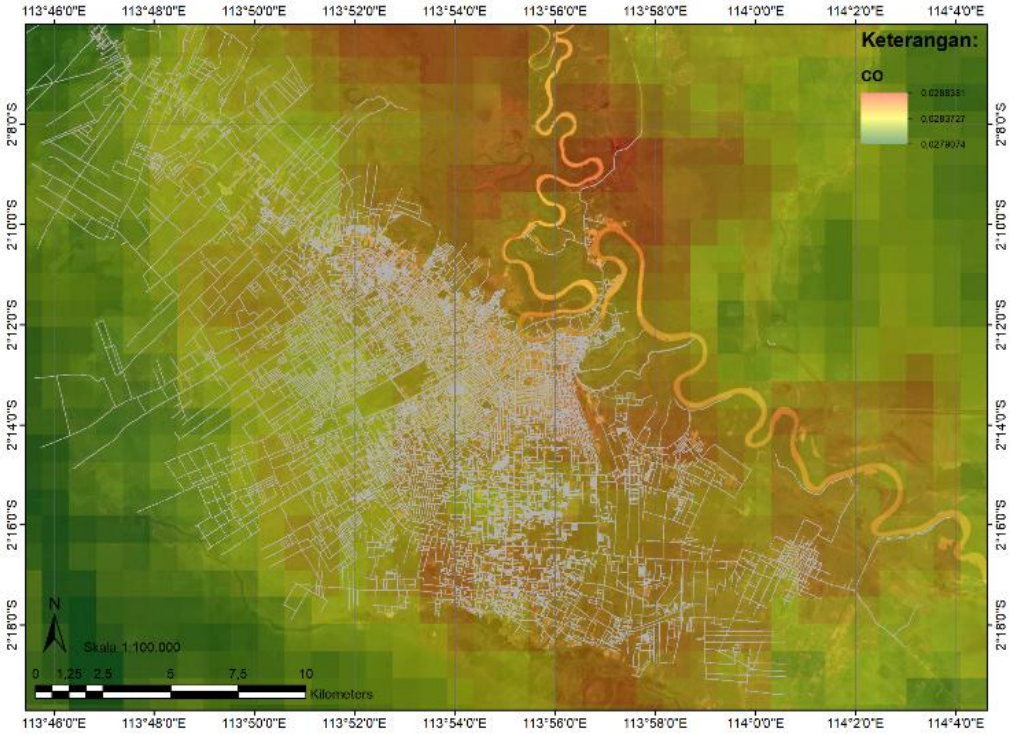


Gambar 6. Sebaran rata-rata kerapatan kolom NO_2 di Kota Palangka Raya (Januari–Desember 2025)

Sebaran Karbon Monoksida (CO)

Distribusi CO menunjukkan pola yang lebih bervariasi dibandingkan NO_2 (Gambar 7). Nilai CO yang lebih tinggi teridentifikasi pada kawasan pusat kota serta lahan terbuka yang berdekatan dengan aktivitas antropogenik, kemudian cenderung menurun ke arah pinggiran wilayah. CO dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna, baik dari bahan bakar kendaraan maupun pembakaran biomassa. Di Kalimantan Tengah, pembakaran lahan gambut merupakan sumber CO yang signifikan

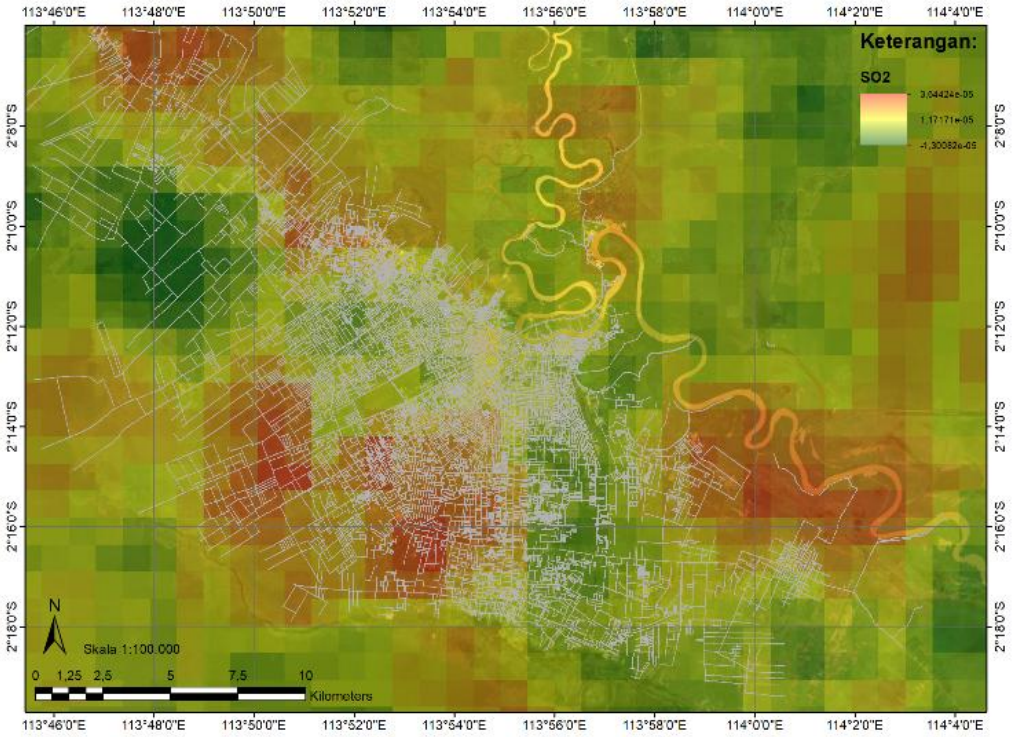
karena proses pembakarannya berlangsung secara membara (*smouldering*) dengan efisiensi pembakaran rendah [4], [6]. Masa hidup CO yang lebih panjang dibandingkan NO_2 juga menyebabkan CO dapat terakumulasi dan terangkut dalam skala yang lebih luas [11], sehingga pola sebarannya tampak lebih kontinu.



Gambar 7. Sebaran rata-rata kerapatan kolom CO di Kota Palangka Raya (Januari–Desember 2025)

Sebaran Sulfur Dioksida (SO_2)

Hasil analisis SO_2 memperlihatkan nilai yang bersifat lokal dan teridentifikasi pada titik-titik tertentu, khususnya di wilayah pinggiran kota dan lahan terbuka (Gambar 8). Pola ini diduga berkaitan dengan sumber emisi skala kecil, seperti pembakaran tidak sempurna bahan bakar, aktivitas pertanian dan perkebunan, pembakaran sampah, atau kegiatan domestik tertentu. Ketidakmerataan sebaran SO_2 menunjukkan bahwa polutan ini lebih dipengaruhi oleh sumber emisi spesifik dibandingkan transportasi atmosfer jarak jauh. Namun demikian, sinyal SO_2 antropogenik pada wilayah dengan emisi rendah sering kali mendekati batas deteksi instrumen sehingga nilai piksel individual dapat dipengaruhi derau pengukuran [12]. Oleh karena itu, titik-titik SO_2 yang teridentifikasi sebaiknya diperlakukan sebagai lokasi indikatif yang memerlukan verifikasi lapangan.



Gambar 8. Sebaran rata-rata kerapatan kolom SO_2 di Kota Palangka Raya (Januari–Desember 2025)

Implikasi Pemanfaatan Sentinel-5P untuk Pemantauan Kualitas Udara

Secara keseluruhan, citra Sentinel-5P yang diolah melalui GEE mampu menggambarkan pola spasial pencemaran udara di Kota Palangka Raya. Keunggulan pendekatan ini dibandingkan pemantauan stasiun darat dirangkum pada Tabel 4, yaitu cakupan wilayah yang luas, ketersediaan data harian yang konsisten, serta pengolahan berbasis awan yang efisien dan dapat direproduksi [14], [8]. Pendekatan ini sesuai sebagai sistem pemantauan awal untuk mengidentifikasi area yang berpotensi tercemar, khususnya lahan terbuka yang rawan terbakar, sehingga pemantauan darat dapat diprioritaskan pada lokasi tersebut.

Tabel 4. Perbandingan pemantauan kualitas udara berbasis satelit dan stasiun darat

Aspek	Sentinel-5P + GEE	Stasiun pemantau darat
Cakupan spasial	Seluruh wilayah kota hingga regional	Titik lokasi stasiun
Resolusi spasial	Sekitar 3,5–5,5 km	Titik (sangat lokal)
Resolusi temporal	Harian (satu kali lintasan)	Kontinu (per jam)
Besaran yang diukur	Kerapatan kolom (mol/m^2)	Konsentrasi permukaan (µg/m^3)
Perbandingan dengan baku mutu	Tidak langsung	Langsung
Biaya	Data terbuka dan gratis	Pengadaan dan operasional tinggi

Sumber: Diolah dari [8] dan [14]

Penelitian ini juga memiliki keterbatasan. Pertama, resolusi spasial Sentinel-5P relatif kasar untuk wilayah kota sehingga variasi pada skala jalan atau kawasan kecil tidak dapat terlihat. Kedua, nilai yang dianalisis berupa kerapatan kolom atmosfer sehingga belum dapat dibandingkan langsung dengan baku mutu udara ambien. Ketiga, analisis menggunakan komposit tahunan sehingga perbedaan antara musim hujan dan kemarau, termasuk kemungkinan lonjakan saat kebakaran lahan, belum diuraikan. Integrasi dengan data stasiun pemantau kualitas udara, data titik panas (*hotspot*), serta data meteorologi seperti arah dan kecepatan angin akan memperkuat interpretasi hasil.

KESIMPULAN

Pemanfaatan citra satelit Sentinel-5P berbasis Earth Engine Data Catalog efektif untuk memantau dan mengidentifikasi pola sebaran pencemaran udara di Kota Palangka Raya. Analisis NO_2, CO, dan SO_2 periode Januari–Desember 2025 menunjukkan perbedaan karakteristik sebaran: NO_2 relatif rendah dan merata, CO lebih tinggi di kawasan perkotaan dan lahan terbuka yang berasosiasi dengan aktivitas antropogenik dan pembakaran biomassa, sedangkan SO_2 teridentifikasi secara lokal pada titik-titik tertentu di wilayah pinggiran dan lahan terbuka.

Kelebihan pendekatan ini adalah cakupan luas, data terbuka, dan proses yang dapat direproduksi, sedangkan kekurangannya adalah resolusi spasial yang kasar dan besaran kerapatan kolom yang tidak setara dengan konsentrasi permukaan. Penelitian lanjutan disarankan memadukan data Sentinel-5P dengan data stasiun pemantau dan meteorologi, melakukan analisis bulanan atau musiman untuk menangkap pengaruh kebakaran lahan, serta mengintegrasikan data titik panas dan tutupan lahan. Pemerintah daerah dapat memanfaatkan pendekatan ini sebagai sistem pemantauan rutin untuk deteksi dini pencemaran udara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palangkaraya atas bimbingan dan dukungan akademik selama penelitian, serta kepada penyedia data Copernicus Sentinel-5P dan Google Earth Engine yang menyediakan data dan platform pengolahan secara terbuka.

REFERENSI

[1] M. Kampa and E. Castanas, "Human health effects of air pollution," *Environ. Pollut.*, vol. 151, no. 2, pp. 362–367, 2008, doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.012.

[2] World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. Geneva, Switzerland: WHO, 2021.

[3] Pemerintah Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta, Indonesia, 2021.

[4] S. E. Page, F. Siegert, J. O. Rieley, H.-D. V. Boehm, A. Jaya, and S. Limin, "The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997," *Nature*, vol. 420, pp. 61–65, 2002, doi: 10.1038/nature01131.

[5] R. D. Field *et al.*, "Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 113, no. 33, pp. 9204–9209, 2016, doi: 10.1073/pnas.1524888113.

[6] V. Huijnen *et al.*, "Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997," *Sci. Rep.*, vol. 6, Art. no. 26886, 2016, doi: 10.1038/srep26886.

[7] P. F. Levelt *et al.*, "The Ozone Monitoring Instrument," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 5, pp. 1093–1101, 2006, doi: 10.1109/TGRS.2006.872333.

[8] J. P. Veefkind *et al.*, "TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications," *Remote Sens. Environ.*, vol. 120, pp. 70–83, 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.09.027.

[9] D. Griffin *et al.*, "High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: First results and validation over the Canadian oil sands," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 46, no. 2, pp. 1049–1060, 2019, doi: 10.1029/2018GL081095.

[10] J. van Geffen *et al.*, "S5P TROPOMI NO_2 slant column retrieval: Method, stability, uncertainties and comparisons with OMI," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 3, pp. 1315–1335, 2020, doi: 10.5194/amt-13-1315-2020.

[11] T. Borsdorff, J. aan de Brugh, H. Hu, I. Aben, O. Hasekamp, and J. Landgraf, "Measuring carbon monoxide with TROPOMI: First results and a comparison with ECMWF-IFS analysis data," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 45, no. 6, pp. 2826–2832, 2018, doi: 10.1002/2018GL077045.

[12] N. Theys *et al.*, "Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: Algorithm theoretical basis," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 10, no. 1, pp. 119–153, 2017, doi: 10.5194/amt-10-119-2017.

[13] M. Bauwens *et al.*, "Impact of coronavirus outbreak on NO_2 pollution assessed using TROPOMI and OMI observations," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47, no. 11, Art. no. e2020GL087978, 2020, doi: 10.1029/2020GL087978.

[14] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sens. Environ.*, vol. 202, pp. 18–27, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

[15] Google Earth Engine. (2025) Sentinel-5P NRTI NO2: Near Real-Time Nitrogen Dioxide (COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2). [Online]. Available: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_NRTI_L3_NO2

[16] N. Hartanto *et al.*, "Kajian konsentrasi nitrogen dioxide (NO_2) dan sulphur dioxide (SO_2) di Pulau Kalimantan menggunakan Google Earth Engine," *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, vol. 16, no. 1, 2024. [Online]. Available: https://envirotek.upnjatim.ac.id/index.php/envirotek/article/view/309