



**TESIS - CM235401**  
**STUDI KONSENTRASI UNSUR GAS RUMAH KACA**  
**DAN POLUTAN DARI DATA SATELIT DI WILAYAH**  
**JABODETABEK**

**BAYU FERIAJI**  
**NRP. 6016232031**

**Dosen Pembimbing**  
**Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA.DESS**

**Program Magister**  
**Departemen Teknik Geomatika**  
**Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya**  
**2025**

***“Halaman sengaja dikosongkan”***



**TESIS - CM235401**

**STUDI KONSENTRASI UNSUR GAS RUMAH KACA  
DAN POLUTAN DARI DATA SATELIT DI WILAYAH  
JABODETABEK**

**BAYU FERIAJI  
NRP. 6016232031**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA.DESS**

**Program Magister  
Departemen Teknik Geomatika  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2025**

***“Halaman sengaja dikosongkan”***



# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (M.T.)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**BAYU FERIAJI**

**NRP. 6016232031**

dengan Judul Tesis

## **STUDI KONSENTRASI UNSUR GAS RUMAH KACA DAN POLUTAN DARI DATA SATELIT DI WILAYAH JABODETABEK**

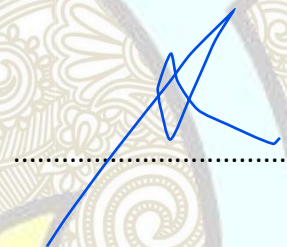
Tanggal Ujian : 16 September 2025

Periode Wisuda : April 2026

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

1. Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA.DESS  
NIP. 195305271983031001



**Penguji:**

1. Prof. Lalu Muhamad Jaelani, S.T., M.Sc., Ph.D.  
NIP. 198012212003121001
2. Dr. Filsa Bioresita, ST., MT  
NIP. 199107192015042002
3. Dr-Ing. Noorlaila Hayati, ST, MT  
NIP. 199006032014042001



Kepala Departemen Teknik Geomatika  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

**Dr. Khomsin, S.T., M.T**

**NIP. 197507052000121001**



***“Halaman sengaja dikosongkan”***

# **STUDI KONSENTRASI UNSUR GAS RUMAH KACA DAN POLUTAN DARI DATA SATELIT DI WILAYAH JABODETABEK**

Nama : Bayu FERIAJI

NRP : 6016232031

Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA.DESS

## **ABSTRAK**

Jabodetabek, sebagai kawasan metropolitan terbesar di Indonesia menghadapi tantangan terkait kualitas udara: polusi tingkat tinggi serta tingginya emisi gas rumah kaca. Penyebab utamanya adalah padatnya aktivitas transportasi dan industri. Tingginya emisi gas rumah kaca dan polutan yang berdampak pada perubahan iklim dan tentunya kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pola sebaran konsentrasi polutan udara nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), dan sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) serta gas rumah kaca metana ( $\text{CH}_4$ ) dan ozon ( $\text{O}_3$ ) secara spasial dan temporal dari tahun 2019 hingga 2023. Pendekatan yang digunakan meliputi analisis musiman, pengaruh fase ENSO, serta melakukan validasi data satelit Sentinel-5P dengan data hasil pengukuran langsung di lapangan (*in situ*). Pengolahan data dilakukan menggunakan platform Google Earth Engine. Validasi sendiri dilakukan di tiga lokasi yang mewakili lingkungan berbeda: urban (IPB CCROM-SEAP Bogor), sub urban (BRIN Serpong), dan rural (BMKG Cibeureum). Instrumen yang digunakan adalah alat pemantau udara dengan pengukuran presisi tinggi yang sudah terkalibrasi dengan gas standar bersertifikat. Hasilnya, tingkat korelasi antara data satelit dan data lapangan ternyata beragam. Untuk polutan, korelasi paling kuat ditemukan pada  $\text{CO}$  ( $r = 0,67$ ) dan  $\text{NO}_2$  ( $r = 0,66$ ), sementara untuk  $\text{SO}_2$  sangatlah lemah ( $r = 0,03$ ). Untuk gas rumah kaca,  $\text{CH}_4$  menunjukkan korelasi yang sedang ( $r = 0,51$ ), sedangkan  $\text{O}_3$  menunjukkan korelasi lemah ( $r = 0,35$ ). Tingkat korelasi untuk  $\text{CO}$  serta  $\text{CH}_4$  tercatat lebih tinggi saat musim hujan dan menurun di musim kemarau. Sebaliknya,  $\text{NO}_2$  menunjukkan korelasi lebih tinggi pada musim kemarau. Walaupun demikian, sebagian data satelit cukup terbukti mampu menangkap variasi musiman dan pola terkait dengan ENSO untuk sebagian besar gas yang diamati di wilayah Jabodetabek. Hasil ini memungkinkan pemantauan kualitas udara yang lebih efektif dan mendukung kebijakan mitigasi pencemaran udara yang lebih tepat.

Kata Kunci: (Gas Rumah Kaca, Jabodetabek, Polutan, Sentinel 5P)

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

# **STUDY OF GREENHOUSE GAS AND POLLUTANT CONCENTRATIONS USING SATELLITE DATA IN THE JABODETABEK REGION**

Name : Bayu Feriaji

NRP : 6016232031

Consultation Lecturer : Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA.DESS

## **ABSTRACT**

As the largest metropolitan area in Indonesia, Jabodetabek faces significant challenges related to air quality, including high levels of pollution and substantial greenhouse gas emissions. The primary sources are the intensive activities of transportation and industry. Elevated greenhouse gas and pollutant emissions contribute both to climate change and to adverse impacts on human health. This study aims to examine the spatial and temporal distribution patterns of air pollutants such as nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), as well as greenhouse gases like methane (CH<sub>4</sub>) and ozone (O<sub>3</sub>) from 2019 to 2023. The approach includes seasonal analysis, the influence of ENSO phases, and validation of Sentinel-5P satellite data against ground-based in-situ measurements. Data processing was conducted using the Google Earth Engine platform. Validation was carried out at three sites representing different environments: urban (IPB CCROM-SEAP, Bogor), suburban (BRIN, Serpong), and rural (BMKG, Cibeureum). The instruments used were high-precision air quality monitors calibrated with certified standard gases. The results indicate varying levels of correlation between satellite and ground-based data. Among pollutants, the strongest correlations were found for CO ( $r = 0,67$ ) and NO<sub>2</sub> ( $r = 0,66$ ), while SO<sub>2</sub> showed a very weak correlation ( $r = 0,03$ ). For greenhouse gases, CH<sub>4</sub> demonstrated a moderate correlation ( $r = 0,51$ ), whereas O<sub>3</sub> exhibited a weak correlation ( $r = 0,35$ ). Correlation levels for CO and CH<sub>4</sub> were generally higher during the wet season and declined in the dry season, whereas NO<sub>2</sub> displayed stronger correlations in the dry season. Nevertheless, the satellite data successfully captured seasonal variations and ENSO-related patterns for most gases observed in Jabodetabek. These findings highlight the potential of satellite-based monitoring to support more effective air quality assessment and inform better-targeted air pollution mitigation policies.

Keywords: (Green House Gases, Jabodetabek, Pollutan, Sentinel 5P)

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

## KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim. Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam, atas limpahan rahmat dan nikmat-Nya kepada penulis, sehingga penulisan tesis yang berjudul **“Studi Konsentrasi Unsur Gas Rumah Kaca dan Polutan dari Data Satelit di Wilayah Jabodetabek”** dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan dan penulisan tesis ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis dengan senang hati menyampaikan terima kasih kepada:

1. Istri, anak dan orang tua yang selalu memotivasi, mendoakan, memberikan dukungan secara moril selama masa perkuliahan ini.
2. Prof. Dr. Ir. Bangun Muljo Sukojo, DEA.DESS sebagai dosen pembimbing pertama yang telah memberikan banyak pengarahan, bimbingan, ilmu, kesempatan, dan waktu untuk membantu penulis.
3. Prof. Lalu Muhamad Jaelani, S.T., M.Sc., Ph.D., Dr. Filsa Bioresita, ST., MT. dan Dr-Ing. Noorlaila Hayati, ST, MT selaku dosen penguji pada sidang proposal dan sidang thesis.
4. Dr. Khomsin, ST, MT sebagai Kepala Departemen Teknik Geomatika ITS.
5. Dr. Filsa Bioresita, ST., MT selaku dosen wali serta Kaprodi Pascasarjana S2 Geomatika ITS.
6. BMKG secara khusus PPSDM atas dukungan dana pendidikan dan data yang telah diberikan demi kelancaran tesis ini.
7. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Geomatika yang telah membantu dan memberi pelajaran akademik maupun non akademik selama masa perkuliahan.
8. Rekan-rekan Program Magister Departemen Teknik Geomatika angkatan 2024 yang telah memberikan semangat dan dukungan.
9. Seluruh pihak yang telah memberikan bantuan materil dan moril.

Akhir kata, penulis mohon maaf atas kekurangan yang terdapat dalam penulisan skripsi ini. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan.

Surabaya, 16 September 2025

***“Halaman sengaja dikosongkan”***



## DAFTAR ISI

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| LEMBAR PENGESAHAN .....              | v    |
| ABSTRAK.....                         | vii  |
| ABSTRACT.....                        | ix   |
| KATA PENGANTAR .....                 | xi   |
| DAFTAR ISI.....                      | xiii |
| DAFTAR GAMBAR .....                  | xv   |
| DAFTAR TABEL.....                    | xvii |
| BAB I PENDAHULUAN .....              | 1    |
| 1.1    Latar Belakang .....          | 1    |
| 1.2    Identifikasi Masalah .....    | 3    |
| 1.3    Batasan Masalah.....          | 3    |
| 1.4    Rumusan Masalah .....         | 4    |
| 1.5    Tujuan Penelitian.....        | 4    |
| 1.6    Manfaat Penelitian.....       | 5    |
| BAB II KAJIAN PUSTAKA.....           | 7    |
| 2.1    Kajian Teori.....             | 7    |
| 2.2    Penelitian Terdahulu .....    | 23   |
| 2.3    Kerangka Teoritis .....       | 25   |
| 2.4    Kerangka Konseptual .....     | 25   |
| 2.5    Hipotesis.....                | 26   |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....  | 27   |
| 3.1    Desain Penelitian.....        | 27   |
| 3.2    Lokasi Penelitian .....       | 27   |
| 3.3    Teknik Pengumpulan Data ..... | 28   |
| 3.4    Teknik Analisis Data .....    | 31   |
| 3.5    Tahapan Pelaksanaan .....     | 32   |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN HASIL.....                            | 41  |
| 4.1    Analisis Stastistik.....                                      | 41  |
| 4.1.1    Polutan .....                                               | 41  |
| 4.1.2    Gas Rumah Kaca.....                                         | 45  |
| 4.2    Analisis Pola Spasial Polutan dan GRK dari Data Satelit ..... | 47  |
| 4.2.1    Polutan .....                                               | 47  |
| 4.2.2    Gas Rumah Kaca.....                                         | 57  |
| 4.3    Analisis Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek .....      | 64  |
| BAB V PENUTUP .....                                                  | 71  |
| 5.1    Kesimpulan.....                                               | 71  |
| 5.2    Saran .....                                                   | 72  |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                  | 75  |
| LAMPIRAN .....                                                       | 81  |
| BIODATA PENULIS.....                                                 | 101 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.....                                                                                                            | 28 |
| Gambar 3.2 Lokasi Stasiun Pemantau Polutan dan GRK di Jabodetabek.....                                                                       | 29 |
| Gambar 3.3 Pos Polusi Udara Cibeureum ( BMKG Cibeureum) (atas) serta Instrumen Pemantau Polutan dan GRK di BRIN Serpong (bawah) .....        | 29 |
| Gambar 3.4 Contoh Citra NO <sub>2</sub> Dari Sentinel 5P Tahun 2023 dari GEE .....                                                           | 31 |
| Gambar 3.5 Diagram Alir Tahapan Pelaksanaan.....                                                                                             | 32 |
| Gambar 3.6 Diagram Alir Tahapan Pengumpulan Data .....                                                                                       | 34 |
| Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Pengolahan Data .....                                                                                        | 37 |
| Gambar 4.1 Distribusi Spasial Konsentrasi CO di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023.....                                 | 49 |
| Gambar 4.2 Distribusi Spasial Konsentrasi CO di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023 .....                                          | 50 |
| Gambar 4.3 Perbandingan antara Konsentrasi CO dari Data Satelit dan Data In Situ di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023).....              | 50 |
| Gambar 4.4 Perbandingan antara Konsentrasi CO dari Data Satelit dan Data In Situ di Jabodetabek Tahunan (2019–2023).....                     | 50 |
| Gambar 4.5 Distribusi Spasial Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023.....                    | 52 |
| Gambar 4.6 Distribusi Spasial Konsentrasi NO <sub>2</sub> di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023. ....                             | 53 |
| Gambar 4.7 Perbandingan antara Konsentrasi NO <sub>2</sub> dari Data Satelit dan Data In Situ di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)..... | 53 |
| Gambar 4.8 Perbandingan antara Konsentrasi NO <sub>2</sub> dari Data Satelit dan Data In Situ di Jabodetabek Tahunan (2019–2023).....        | 53 |
| Gambar 4.9 Distribusi Spasial Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023.....                    | 55 |
| Gambar 4.10 Distribusi Spasial Konsentrasi SO <sub>2</sub> di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023 .....                            | 56 |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.11 Perbandingan antara Konsentrasi $\text{SO}_2$ dari Data Satelit dan Data In Situ di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023) .....           | 56 |
| Gambar 4.12 Perbandingan antara Konsentrasi $\text{SO}_2$ dari Data Satelit dan Data In Situ di Jabodetabek Tahunan (2019–2023) .....                  | 56 |
| Gambar 4.13 Distribusi Spasial Konsentrasi $\text{CH}_4$ di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023.....                               | 59 |
| Gambar 4.14 Distribusi Spasial Konsentrasi $\text{CH}_4$ di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023 .....                                        | 60 |
| Gambar 4.15 Perbandingan antara Konsentrasi $\text{CH}_4$ dari Data Satelit Terkoreksi dan Data In Situ di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)..... | 60 |
| Gambar 4.16 Perbandingan antara Konsentrasi $\text{CH}_4$ dari Data Satelit Terkoreksi dan Data In Situ di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)..... | 60 |
| Gambar 4.17 Distribusi Spasial Konsentrasi $\text{O}_3$ di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023.....                                | 62 |
| Gambar 4.18 Distribusi Spasial Konsentrasi $\text{O}_3$ di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023 .....                                         | 63 |
| Gambar 4.19 Perbandingan antara Konsentrasi $\text{O}_3$ dari Data Satelit Terkoreksi dan Data In Situ di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023).....  | 63 |
| Gambar 4.20 Perbandingan antara Konsentrasi $\text{O}_3$ dari Data Satelit Terkoreksi dan Data In Situ di Jabodetabek Tahunan (2019–2023).....         | 63 |
| Gambar 4.21 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2019.....                                                                                  | 65 |
| Gambar 4.22 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2020.....                                                                                  | 66 |
| Gambar 4.23 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2021.....                                                                                  | 66 |
| Gambar 4.24 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2022.....                                                                                  | 67 |
| Gambar 4.25 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2023.....                                                                                  | 68 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 Dataset Produk Sentinel 5P .....                                       | 9  |
| Tabel 2.2 Massa Molar Gas Polutan Udara dan Gas Rumah Kaca.....                  | 11 |
| Tabel 2.3 Tabel Indeks Standar Pencemar Udara .....                              | 13 |
| Tabel 2.4 Kategori IKU sesuai Permen LHK No. 27 Tahun 2021 .....                 | 16 |
| Tabel 2.5 Nilai Oceanic Nino Index (ONI).....                                    | 18 |
| Tabel 2.6 Kriteria Penentuan Status ENSO Berdasarkan Standar BMKG .....          | 18 |
| Tabel 2.7 Tabel Penelitian Terdahulu .....                                       | 23 |
| Tabel 3.1 Daftar Stasiun Pemantau GRK dan Polutan .....                          | 28 |
| Tabel 3.2 Dataset Parameter GRK dan Polutan .....                                | 30 |
| Tabel 4.1 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi CO .....              | 42 |
| Tabel 4.2 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi NO <sub>2</sub> ..... | 43 |
| Tabel 4.3 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi SO <sub>2</sub> ..... | 44 |
| Tabel 4.4 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi CH <sub>4</sub> ..... | 45 |
| Tabel 4.5 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi O <sub>3</sub> .....  | 46 |
| Tabel 4.6 Tabel Perbandingan IKU Satelit dengan Laporan Ditjen PPKL .....        | 69 |

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Jabodetabek adalah sebuah kawasan megapolitan terbesar yang ada di Indonesia dimana memiliki tingkat kepadatan penduduk yang sangat tinggi dan memiliki peranan penting dan pengaruh terhadap Indonesia (Rustiadi et al., 2015). Wilayah ini terdiri dari Provinsi DKI Jakarta sebagai pusat utama, yang terbagi menjadi beberapa kota/kabupaten, serta wilayah penunjang lainnya, seperti Kota dan Kabupaten Bekasi, Kota dan Kabupaten Bogor, Kota Depok yang berada di Provinsi Jawa Barat, serta Kota dan Kabupaten Tangerang serta Kota Tangerang Selatan yang berada di Provinsi Banten. Secara keseluruhan Jabodetabek mempunyai luas 7.076,31 km<sup>2</sup> (BPS, 2023).

Sebagai kawasan megapolitan terbesar, Jabodetabek menghadapi masalah pencemaran udara yang serius. Gas rumah kaca (GRK) dan polutan udara menjadi tantangan utama di wilayah perkotaan ini. Selain itu juga, sebuah megapolitan menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) dan polutan ke udara. Kota-kota maju dengan tingkat urbanisasi tinggi memang berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) (Hoornweg et al., 2011). Begitu pula dengan emisi polutan, peningkatan ekonomi dan urbanisasi yang umum terjadi di sebuah megapolitan telah menyebabkan lonjakan signifikan dalam penggunaan energi, yang akhirnya memicu pelepasan emisi polutan yang jauh lebih besar (Chan & Yao, 2008). Sehingga secara umum beberapa kota besar menghasilkan gas rumah kaca dan polutan dalam jumlah yang besar (Baklanov et al., 2016).

Gas rumah kaca (GRK) merupakan kumpulan dari beberapa gas-gas yang ada di atmosfer yang dapat menyerap dan memerangkap panas (radiasi inframerah) yang dipancarkan oleh permukaan bumi. GRK terdiri dari beberapa gas utama seperti karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) dan ozon (O<sub>3</sub>) (Lead et al., n.d.). GRK dan polutan udara saling berkaitan, GRK berperan dalam mempengaruhi perubahan iklim secara global, sedangkan polutan udara lebih berdampak langsung pada kesehatan manusia dan kualitas udara di tingkat lokal. Namun dari penelitian ozon (O<sub>3</sub>) pun dapat mempengaruhi kesehatan manusia (Kong et al., 2022) (Lefohn

et al., 2018). Bahkan berdasarkan hasil studi paparan terkontrol terhadap beberapa sukarelawan, ozon ( $O_3$ ) yang terhirup ketika aktifitas dapat meningkatkan gangguan fungsi jantung, yang memperkuat dasar ada kaitan antara paparan ozon ( $O_3$ ) dengan peningkatan angka kematian (Devlin et al., 2012). Pengaruh signifikan bagi kesehatan manusia ini tentunya menjadi perhatian penting.

Polutan merupakan zat atau senyawa yang mencemari lingkungan dan dapat menyebabkan kerugian atau dampak negatif terhadap kesehatan makhluk hidup maupun ekosistemnya. Polutan udara, dalam hal ini, sebagian besar dihasilkan oleh aktivitas manusia. Partikulat halus (PM10, PM2.5), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida ( $SO_2$ ), nitrogen oksida ( $NO_x$ ) merupakan polutan utama yang menjadi perhatian saat ini. Polusi udara di wilayah perkotaan adalah salah satu isu lingkungan utama, khususnya di negara-negara yang sedang berkembang (Mayer, 1999). Pelepasan polutan udara berasal dari berbagai aktivitas manusia yang mencakup kategori sumber seperti transportasi kendaraan bermotor, kegiatan industri, operasi pembangkit listrik, sektor perdagangan, dan penggunaan bahan bakar di rumah tangga (Mayer, 1999). Kegiatan ini umum sekali ada di wilayah perkotaan seperti Jabodetabek.

Sejak tahun 2016, National Institute for Environmental Studies (NIES) Jepang berkerja sama dengan IPB, BRIN, serta BMKG bersinergi dalam melakukan pengamatan gas rumah kaca dan polutan untuk memperkirakan emisi yang terjadi karena aktifitas manusia di wilayah Jabodetabek (Nishihashi et al., 2019). Ada tiga stasiun pemantauan berbasis darat (*ground-based monitoring*) berada di sekitar Jabodetabek yang melakukan pengamatan GRK dan polutan secara komprehensif. Selain tiga pengamatan GRK dan polutan tersebut, tentunya masih banyak lagi stasiun pengamatan GRK maupun polutan yang berada di wilayah ini.

Penggunaan data satelit dalam pemantauan GRK dan polutan tentunya sudah umum saat ini. Namun, validasi data satelit menggunakan data pemantauan berbasis darat (*ground-based monitoring*) tetap diperlukan untuk memastikan akurasi dan keandalannya. Data dari stasiun pemantauan berbasis darat (*ground-based monitoring*) dapat digunakan untuk memvalidasi data citra satelit yang menghasilkan informasi tentang GRK dan polutan. Perbandingan antara data stasiun pemantauan berbasis darat dengan data satelit untuk dicari



korelasinya (Ialongo et al., 2020). Satelit Sentinel 5 merupakan salah satu satelit yang menyediakan beberapa data GRK dan polutan (Veefkind et al., 2012). Dengan bantuan Google Earth Engine satelit ini dapat menyediakan data GRK dan polutan dengan resolusi menengah secara *realtime* (Kazemi Garajeh et al., 2023)(Yousefi Kebriya et al., 2025)(Hamzeh et al., 2023)(Ikram et al., 2022)(Wang et al., 2022). Data dari citra satelit perlu divalidasi untuk memastikan tingkat keakuratannya dengan membandingkannya terhadap data sebenarnya yang diperoleh dari pengukuran lapangan. Hasil validasi tersebut nantinya dapat digunakan untuk melengkapi informasi di daerah yang memiliki keterbatasan stasiun pemantauan untuk GRK dan polutan.

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Jabodetabek sebagai kawasan megapolitan menghadapi permasalahan pencemaran udara yang serius. Aktivitas manusia didalamnya menyebabkan emisi GRK dan polutan udara yang signifikan. Sehingga memicu lonjakan emisi GRK dan polutan udara yang berdampak pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Penggunaan data satelit dalam pemantauan GRK dan polutan menjadi hal yang sudah umum digunakan untuk mengisi kekosongan wilayah yang tidak memiliki stasiun pemantaun GRK dan polutan. Validasi data satelit dengan data stasiun pemantauan berbasis darat (*ground-based monitoring station*) diperlukan untuk memastikan akurasi dan keandalan hasil pengamatan. Dengan validasi yang baik, data satelit yang digunakan untuk analisis lebih lanjut mengenai GRK dan polutan dapat memiliki nilai yang lebih tinggi dalam hal akurasi dan keandalannya.

## **1.3 Batasan Masalah**

Berdasarkan pembahasan pada latar belakang sebelumnya, maka batasan masalah pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Wilayah studi berada di Jabodetabek dengan menggunakan tiga titik stasiun pemantauan GRK dan polutan dalam periode 2019-2023
2. Unsur paramater yang digunakan berupa polutan yang terdiri dari : nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), karbon monoksida (CO) dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) serta GRK yang terdiri dari metana (CH<sub>4</sub>) dan ozon (O<sub>3</sub>).

3. Data satelit yang digunakan produk dari Sentinel 5P (TROPOMI)
4. Metode statistik yang digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis perbandingan berupa root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), bias (Mean Bias Error), serta analisis korelasi berupa korelasi pearson ( $r$ ) dan koefisien determinasi ( $R^2$ ). Penggunaan regresi linear juga digunakan untuk melakukan koreksi terhadap data satelit.

#### **1.4 Rumusan Masalah**

Berdasarkan pembahasan pada latar belakang sebelumnya, maka rumusan masalah pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Bagaimana tingkat konsentrasi polutan ( $\text{NO}_2$ , CO dan  $\text{SO}_2$ ) dan GRK ( $\text{CH}_4$  dan  $\text{O}_3$ ) di wilayah Jabodetabek berdasarkan data satelit Sentinel 5P dengan memperhatikan variasi musim serta fenomena meteorologi seperti La Nina dan El Nino selama periode 2019-2023 ?
2. Sejauh mana keakuratan dan keandalan data citra satelit dalam memantau polutan dan GRK jika dibandingkan dengan data yang diperoleh dari stasiun pemantauan berbasis darat di wilayah Jabodetabek ?
3. Bagaimana pemanfaatan data satelit yang telah tervalidasi dapat memberikan informasi yang akurat mengenai konsentrasi polutan maupun GRK di wilayah Jabodetabek, khususnya di daerah-daerah yang tidak terjangkau oleh stasiun pemantauan berbasis darat. Sehingga dapat pula memberikan informasi Indeks Kualitas Udara yang lebih efektif?

#### **1.5 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan permasalahan sebelumnya maka tujuan pada penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Memvalidasi data citra satelit yang digunakan dalam pemantauan polutan dan GRK dengan yang diperoleh dari stasiun pemantauan berbasis darat guna memastikan akurasi dan keandalan data satelit.
2. Menganalisis konsentrasi polutan dan GRK di wilayah Jabodetabek berdasarkan data satelit Sentinel 5P dengan memperhatikan variasi musim

serta fenomena meteorologi seperti La Nina dan El Nino selama periode 2019-2023.

3. Memanfaatkan data satelit yang telah tervalidasi untuk menghasilkan informasi spasial polutan dan GRK di Jabodetabek, terlebih di wilayah yang tidak tercakup oleh pemantauan polutan maupun GRK, serta menghitung Indeks Kualitas Udara (IKU) secara lebih komprehensif.

### **1.6 Manfaat Penelitian**

Berdasarkan pembahasan pada latar belakang sebelumnya, maka manfaat pada penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Memberikan gambaran yang lebih jelas tentang konsentrasi polutan dan GRK di wilayah Jabodetabek dalam kurun waktu 2019-2023, serta kaitannya dengan variasi musim dan fenomena meteorologi seperti La Nina dan El Nino.
2. Dengan melakukan validasi data satelit terhadap data pengamatan lapangan, penelitian ini dapat memastikan keakuratan data yang digunakan, sehingga data satelit dapat diandalkan untuk analisis di masa depan, sebagai perlengkap pemantauan kualitas udara berbasis darat
3. Menghasilkan perhitungan Indeks Kualitas Udara (IKU) berbasis data satelit yang dapat digunakan untuk pemantauan yang lebih efektif serta dapat mendukung pengambilan kebijakan pengendalian pencemaran udara di wilayah megapolitan ini.

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Teori**

##### **2.1.1 Gas Rumah Kaca**

Gas rumah kaca (GRK) dapat dikatakan merupakan sebuah sekumpulan gas di atmosfer yang berfungsi menahan panas, layaknya dinding kaca pada sebuah rumah kaca, sehingga suhu di permukaan bumi tetap nyaman (Aldrian, Edvin, Karmini, M., & Budiman, n.d., 2011). Gas rumah kaca (GRK) memiliki berbagai sumber. Uap air merupakan sumber terbesar GRK yang terbentuk secara alami. Selain itu, ada juga GRK yang dihasilkan oleh aktivitas manusia atau bersifat antropogenik. Berdasarkan Protokol Kyoto, terdapat enam jenis GRK antropogenik, yaitu karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorokarbon (HFCs), perfluorokarbon (PFCs), dan sulfur heksafluorida ( $\text{SF}_6$ ) (Aldrian, Edvin, Karmini, M., & Budiman, n.d., 2011). Sebagian literatur memasukan ozon ( $\text{O}_3$ ) juga sebagai salah satu dari GRK. Ozon ( $\text{O}_3$ ) merupakan GRK terbesar setelah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ) (Lead et al., n.d.). Pembedanya antara ozon ( $\text{O}_3$ ) dengan gas GRK lainnya terletak pada umurnya yang paling pendek, waktu paruh ozon troposfer bervariasi antara 6 hingga 27 hari, tergantung pada lokasi sumber dan musimnya (Prather & Zhu, 2024). Konsentrasi ozon ( $\text{O}_3$ ) sangat bervariasi secara lokal dan regional. Oleh sebab itu, ozon ( $\text{O}_3$ ) tidak secara langsung dimasukkan dalam daftar GRK pada Protokol Kyoto, meskipun dampaknya terhadap pemanasan global dan kesehatan manusia tetap signifikan. Maka di literatur lainnya ozon ( $\text{O}_3$ ) (dalam hal ini ozon ( $\text{O}_3$ ) permukaan) merupakan polutan sekunder yang terbentuk dari hasil reaksi fotokimia antara zat prekursor (polutan lainnya) dengan sinar matahari (Kusumaningtyas et al., 2024).

Gas rumah kaca lainnya yang akan di bahas dalam penelitian ini adalah metana ( $\text{CH}_4$ ). Metana ( $\text{CH}_4$ ) adalah gas rumah kaca yang penting dengan potensi pemanasan global yang 23 kali lebih tinggi dibandingkan dengan  $\text{CO}_2$ . Gas ini menyumbang sekitar 14% dari total emisi gas rumah kaca global (López et al.,

2013). Sumber emisi metana ( $\text{CH}_4$ ) dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu sumber alami dan sumber antropogenik. Dalam kategori sumber alami, lahan basah merupakan kontributor yang paling signifikan (Petrescu et al., 2008). Kawasan tropis dan Belahan Bumi Selatan seperti Indonesia ini telah teridentifikasi sebagai kontributor utama emisi  $\text{CH}_4$ , di mana aktivitas bakteri dan pembakaran biomassa menjadi dua faktor yang paling berpengaruh (Mikaloff Fletcher et al., 2004). Waktu paruh metana ( $\text{CH}_4$ ) lebih lama dari pada ozon ( $\text{O}_3$ ), namun jauh lebih sebentar daripada karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ). Estimasi waktu paruh metana ( $\text{CH}_4$ ) di atmosfer adalah 7,9 tahun, angka ini telah meningkat sebesar 25-30% selama 150 tahun terakhir (LELIEVELD et al., 1998).

### **2.1.2 Polutan**

Polutan merupakan zat yang dapat mencemari lingkungan dan berada baik itu di udara, perairan maupun tanah. Polutan memberikan dampak negatif terhadap kerusakan lingkungan maupun kesehatan makhluk hidup. Polutan di udara yang paling umum berupa hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), senyawa organik yang mudah menguap (VOC, misalnya, benzena), materi partikulat (PM, paling sering  $\text{PM}_{2.5}$  dan  $\text{PM}_{10}$ ), polutan gas, seperti karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), oksida nitrogen ( $\text{NO}_x$ ), sulfur oksida ( $\text{SO}_2$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), logam berat (Fernanda et al., 2023). Dalam penelitian ini polutan yang akan di kaji hanya pada seperti karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), sulfur oksida ( $\text{SO}_2$ ).

### **2.1.3 Satelit Sentinel 5P**

Ada beberapa satelit pemantauan GRK dan polutan. Satelit-satelit ini berperan penting dalam memantau perubahan atmosfer serta kualitas udara global, termasuk juga pemantauan mengenai perubahan iklim yang terjadi akibat kenaikan GRK. Beberapa satelit diantaranya seperti MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) pada satelit Terra dan Aqua juga memiliki sensor khusus untuk memonitor emisi gas rumah kaca. Sentinel-5P, bagian dari program Copernicus, dirancang juga untuk memantau kualitas udara dengan mendeteksi polutan seperti nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), dan metana ( $\text{CH}_4$ ). Selain itu juga, satelit AURA fokus pada pengukuran kimia atmosfer, termasuk ozon stratosfer dan polusi

udara. Dan ada juga GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) dari Jepang menjadi pionir dalam mendeteksi konsentrasi karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan metana ( $\text{CH}_4$ ).

Satelit Sentinel-5P, merupakan misi pertama dalam program Copernicus yang didedikasikan untuk pemantauan atmosfer yang diluncurkan di Rusia pada tanggal 13 Oktober 2017. Satelit ini berperan dalam mengumpulkan data untuk pemantauan kualitas udara. TROPOMI, sebagai sensor multispektral, merekam reflektansi pada berbagai panjang gelombang yang digunakan untuk mengukur konsentrasi gas atmosfer, termasuk ozon, metana, formaldehida, aerosol, karbon monoksida, nitrogen oksida, dan sulfur dioksida (developers.google.com, 2019). Dengan kemampuan jelajah yang tinggi Sentinel-5P mampu memetakan seluruh permukaan bumi setiap hari. Berikut ini merupakan spesifikasi dataset dari Sentinel 5P berdasarkan masing-masing parameter produk pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Dataset Produk Sentinel 5P

| No | Parameter                         | Resolusi Spasial        | Resolusi Temporal | Satuan            | Nilai Perkiraan<br><i>Min - Max</i> | Deskripsi                                                                      |
|----|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Metana ( $\text{CH}_4$ )          | 5,5 x 7 $\text{km}^2$   | 1 Hari            | Mol fraction      | 1285-2405                           | Rata-rata kolom udara kering dari metana dalam satuan bagian per miliar (ppb). |
| 2  | Ozon ( $\text{O}_3$ )             | 5 x 5 $\text{km}^2$     | 1 Hari            | Mol/ $\text{M}^2$ | 0,025-0,3048                        | Total ozon dalam kolom atmosfer                                                |
| 3  | Karbon Monoksida ( $\text{CO}$ )  | 5,5 x 7 $\text{km}^2$   | 1 Hari            | Mol/ $\text{M}^2$ | -34.43 - 5.71                       | Kerapatan vertikal kolom CO                                                    |
| 4  | Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ ) | 5,5 x 3,5 $\text{km}^2$ | 1 Hari            | Mol/ $\text{M}^2$ | -0.4051-0.2079                      | Kerapatan vertikal kolom $\text{SO}_2$                                         |

|   |                                      |                           |        |                    |                   |                                          |
|---|--------------------------------------|---------------------------|--------|--------------------|-------------------|------------------------------------------|
| 5 | Nitrogen Dioksida (NO <sub>2</sub> ) | 5,5 x 3,5 km <sup>2</sup> | 1 Hari | Mol/M <sup>2</sup> | -0.00051 - 0.0192 | Kerapatan vertikal kolom NO <sub>2</sub> |
|---|--------------------------------------|---------------------------|--------|--------------------|-------------------|------------------------------------------|

Situs resmi Earth Engine Data Catalog menyebutkan bahwa instrumen TROPOMI mampu melakukan pengamatan dengan resolusi spasial 0,01 derajat busur. Tingkat resolusi ini setara dengan kemampuan instrumen untuk memetakan area di permukaan Bumi dengan sangat detail, di mana setiap pikselnya mencakup wilayah sekitar 1,1 km x 1,1 km.

Produk Sentinel 5P untuk memantau kualitas udara dan gas atmosfer mempunyai satuan yang berbeda dengan pengamatan *in situ*. Untuk memungkinkan melakukan perbandingan dengan pengamatan *in situ* maka diperlukan konversi satuan agar mendapatkan satuan yang sama dengan satuan yang dipakai pada pengamatan *in situ*. Satuan yang digunakan oleh data satelit untuk pengukuran konsentrasi gas atmosfer adalah mol/m<sup>2</sup> (mol per meter persegi). Ini berarti jumlah molekul gas yang terdistribusi di atas satu meter persegi permukaan Bumi dalam satuan mol. Secara sederhana, mol/m<sup>2</sup> menggambarkan jumlah total gas yang ada di dalam kolom atmosfer yang melewati area seluas satu meter persegi. Ini digunakan untuk menggambarkan jumlah gas di atmosfer pada lapisan tertentu, dari permukaan hingga ketinggian tertentu, dengan memperhitungkan kedalaman kolom atmosfer tersebut. Sedangkan data *in situ* mempunyai satuan ppb. PPB (Parts Per Billion) adalah satuan yang digunakan untuk mengukur konsentrasi gas dalam jumlah yang sangat kecil. Satu ppb berarti satu bagian dari gas per satu milyar bagian udara (1 bagian gas per 1.000.000.000 bagian udara). Satuan ini sering digunakan dalam pengukuran polutan udara atau gas rumah kaca, seperti NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> dan lainnya, karena gas-gas ini ada dalam konsentrasi yang sangat kecil di atmosfer, terutama pada level permukaan.

Maka untuk memungkinkan perbandingan langsung dan validasi antara pengukuran satelit dan *in situ*, konversi satuan dilakukan untuk menyelaraskan data. Untuk mengonversi data satelit ke dalam bentuk yang dapat dibandingkan dengan pengukuran permukaan *in situ*, diterapkan asumsi penyederhanaan: konsentrasi gas dianggap terdistribusi secara merata di seluruh ketinggian rata-rata troposfer.



Konversi dilakukan dengan cara membagi total densitas kolom parameter dengan total kolom udara kering yang diestimasi dari data tekanan ECMWF pada lokasi yang bersesuaian (Borsdorff et al., 2018). Namun, untuk menyederhanakan, kolom udara dianggap memiliki ketinggian tertentu, yang umumnya diperkirakan sekitar 10 km dalam analisis skala global (Martin, 2008). Berdasarkan asumsi ini, konsentrasi rata-rata sepanjang kolom dapat dihitung, memungkinkan kerapatan kolom satelit untuk diekspresikan dalam satuan konsentrasi tingkat permukaan (ppb). Hal ini memungkinkan perbandingan yang konsisten antara kedua sumber data (Savenets, 2021).

Adapun persamaan untuk mengkonversi nilai pada produk Sentinel 5P menjadi nilai pada pengamatan *in situ* dapat digunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{Cs}{H} \times M \times A \quad (1)$$

Dimana:

$C$  : Konsentrasi Gas di dekat permukaan tanah ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$H$  : Ketebalan lapisan atmosfer tempat gas tersebar (m)

$Cs$  : Kandungan gas yang tercatat oleh satelit ( $\text{mol}/\text{m}^2$ )

$M$  : Massa molar gas ( $\text{g}/\text{mol}$ )

$A$  : Faktor konversi dari  $\text{g}/\text{m}^3$  ke  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , yang bernilai  $10^6$

Massa molar gas-gas (dalam  $\text{g}/\text{mol}$ ) disajikan dalam tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Massa Molar Gas Polutan Udara dan Gas Rumah Kaca

| No | Senyawa Gas (Simbol)                | Massa Molar Gas ( $\text{g}/\text{mol}$ ) |
|----|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1  | Karbon Monoksida (CO)               | 28,01                                     |
| 2  | Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_2$ ) | 46,0005                                   |
| 3  | Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ )   | 64,066                                    |
| 4  | Metana ( $\text{CH}_4$ )            | 16,04                                     |
| 5  | Ozon ( $\text{O}_3$ )               | 48,00                                     |

Nilai-nilai molar gas ini diperoleh dengan menjumlahkan massa atom unsur-unsur pembentuk molekul setiap gas (Haynes, 2013).

Untuk mengonversi konsentrasi dari  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ke ppb, langkah konversi tambahan diterapkan. Konversi ini mengasumsikan kondisi atmosfer standar, khususnya tekanan 1 atm dan suhu udara  $25^\circ\text{C}$  (298,15 K). Dalam kondisi ini, hubungan antara konsentrasi massa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dan rasio pencampuran volume (ppb) dapat diperkirakan secara akurat menggunakan hukum gas ideal.

$$ppb = \frac{C \times R \times T}{P \times M} \times 10^3 \quad (2)$$

Dimana:

$C$  : Konsentrasi Gas di dekat permukaan tanah ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$R$  : Konstanta gas ideal =  $8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

$T$  : Suhu dalam Kelvin (diasumsikan 298,15 K, atau  $25^\circ\text{C}$ )

$P$  : Tekanan dalam Pascal (diasumsikan 101325 Pa, atau 1 atm)

$M$  : Massa molar gas (dalam g/mol)

$10^3$  : Faktor konversi dari gram ke mikrogram ( $\mu\text{g}$ )

Ada beberapa keterbatasan dalam konversi ini. Pertama, terdapat asumsi bahwa tinggi kolom atmosfer seragam sebesar 10 km. Selain itu, penggunaan suhu udara tetap  $25^\circ\text{C}$  dan tekanan konstan 1 atm mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi dunia nyata, karena nilai-nilai ini dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada waktu dan lokasi.

Di samping keterbatasan yang terkait dengan asumsi konversi, penggunaan data juga dipastikan melalui proses seleksi dan penyaringan yang ketat untuk mengurangi nilai ketidakpastian. Untuk produk data Sentinel-5P, parameter utama yang digunakan untuk validasi kualitas data adalah *qa\_value* (*quality assurance value*). Parameter ini memberikan nilai antara 0 (kualitas terendah) hingga 1 (kualitas tertinggi), yang merepresentasikan tingkat kepercayaan terhadap hasil pengukuran. Nilai yang mendekati 1 mengindikasikan data dengan tingkat

kepastian terbaik, bebas dari kontaminasi seperti awan tebal, aerosol, kesalahan algoritma, atau kondisi permukaan yang sulit. Dalam banyak penelitian untuk melakukan penyaring data menggunakan *qa\_value* ini dengan menetapkan ambang batas  $> 0.75$  (Pazmino et al., 2021; Verhoelst et al., 2020). Apabila *qa\_value* tidak mengalami kendala saat pengumpulan ataupun pemanggilan data, penyaringan alternatif yang efektif adalah menggunakan parameter *cloud fraction* (Latsch et al., 2022). Parameter ini secara spesifik mengestimasi nilai piksel yang tertutup oleh awan, dengan rentang nilai dari 0 (langit cerah) hingga 1 (sepenuhnya tertutup awan). Data tutupan awan ini mempunyai hubungan dengan *qa\_value* seperti yang dijelaskan sebelumnya. Untuk memastikan pengamatan yang jelas terhadap atmosfer di dekat permukaan, umumnya hanya data dengan nilai *cloud fraction* yang sangat rendah (misalnya,  $< 0.2$ ) yang diikutsertakan dalam analisis.

#### 2.1.4 Batas Ambang Polutan

Beberapa GRK dan Polutan mempunyai batas ambang untuk kesehatan. Batas ambang ini diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara. Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) adalah angka tanpa satuan yang menggambarkan kualitas udara ambien di suatu lokasi, yang dihitung berdasarkan dampaknya terhadap kesehatan manusia, estetika, dan makhluk hidup lainnya. ISPU disampaikan dalam rentang waktu pengukuran konsentrasi udara ambien rata-rata dalam 24 jam. Berikut ini adalah tabel ISPU sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia.

Tabel 2.3 Tabel Indeks Standar Pencemar Udara

| ISPU   | 24 Jam<br>Ozon (O <sub>3</sub> )<br>µg/m <sup>3</sup> | 24 Jam<br>Karbon<br>Monoksida<br>(CO) µg/m <sup>3</sup> | 24 Jam<br>Sulfur<br>Dioksida<br>(SO <sub>2</sub> ) µg/m <sup>3</sup> | 24 Jam<br>Nitrogen<br>Dioksida<br>(NO <sub>2</sub> ) µg/m <sup>3</sup> | Kategori ISPU |
|--------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 0 - 50 | 120                                                   | 4.000                                                   | 52                                                                   | 80                                                                     | Baik          |

|                                                                                                                                                                                                                                                       |       |        |       |       |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|-------|-------|--------------------|
| 51 - 100                                                                                                                                                                                                                                              | 235   | 8.000  | 180   | 200   | Sedang             |
| 101 - 200                                                                                                                                                                                                                                             | 400   | 15.000 | 400   | 1.130 | Tidak Sehat        |
| 201 - 300                                                                                                                                                                                                                                             | 800   | 30.000 | 800   | 2.260 | Sangat Tidak Sehat |
| > 300                                                                                                                                                                                                                                                 | 1.000 | 45.000 | 1.200 | 3.000 | Berbahaya          |
| Hasil perhitungan ISPU, sulfur dioksida (SO <sub>2</sub> ), karbon monoksida (CO), ozon (O <sub>3</sub> ) dan nitrogen dioksida (NO <sub>2</sub> ), diambil nilai ISPU parameter tertinggi paling sedikit disampaikan setiap jam 09.00 dan jam 15.00. |       |        |       |       |                    |

Sementara Indeks Kualitas Udara (IKU) adalah ukuran komposit yang digunakan untuk menilai kualitas udara rata-rata di Indonesia. IKU mencakup polutan utama seperti CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, dan O<sub>3</sub> (Mukhtar et al., 2018). Namun dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Air untuk Penentuan Status Mutu Air Sungai, IKU hanya menggunakan dua parameter polutan yaitu NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2021). Perhitungan IKU dilakukan dengan menggabungkan nilai konsentrasi masing-masing polutan dan mengalikannya dengan faktor konversi tertentu untuk menghasilkan angka yang mencerminkan kondisi kualitas udara. Setiap polutan diberikan bobot dan skala tertentu sesuai dengan dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Nilai IKU kemudian dikategorikan ke dalam rentang yang menggambarkan kualitas udara, mulai dari kategori 'Sangat Baik', 'Baik', 'Sedang', hingga 'Kurang' dan 'Sangat Kurang'.

Dalam Permen LHK No. 27 Tahun 2021 itu juga memberikan pedoman tentang standar kualitas udara dan cara perhitungannya. Dalam perhitungan IKU, dilakukan agregasi dari nilai konsentrasi polutan di beberapa lokasi pemantauan, yang kemudian dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditetapkan.

Ketentuan jumlah data minimum dalam kegiatan pemantauan kualitas udara ditentukan berdasarkan metode yang digunakan. Pada metode passive sampler, diperlukan sedikitnya 28 hari pemantauan dalam satu tahun, yang dapat dilaksanakan dengan variasi periode, misalnya selama 7 hari sebanyak empat kali

atau 14 hari sebanyak dua kali. Untuk metode manual aktif, jumlah minimum data yang harus diperoleh adalah 24 hari pemantauan per tahun, dengan frekuensi rata-rata dua kali setiap bulan dan durasi pemantauan selama 24 jam. Sementara itu, pada metode Air Quality Monitoring System (AQMS) *fixed station*, jumlah data minimum yang dipersyaratkan adalah sebesar 65% dari total data tahunan, atau setara dengan 238 data harian dalam satu tahun.

Secara matematis, langkah tahapan perhitungan IKU dirumuskan sebagai berikut (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2021):

1. Menghitung Indeks NO<sub>2</sub>

$$\text{Indeks NO}_2 = \frac{\text{Rata-rata Konsentrasi NO}_2 \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}}{\text{Baku Mutu EU NO}_2 \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}} \quad (3)$$

2. Menghitung Indeks SO<sub>2</sub>

$$\text{Indeks SO}_2 = \frac{\text{Rata-rata Konsentrasi SO}_2 \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}}{\text{Baku Mutu EU SO}_2 \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}} \quad (4)$$

3. Menghitung Indeks Udara Model EU (IEU)

$$\text{IEU} = \frac{\text{Indeks NO}_2 \text{ (}\mu\text{g / m}^3\text{)} + \text{SO}_2 \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}}{2} \quad (5)$$

4. Menghitung Indeks Kualitas Udara (IKU)

$$\text{IKU} = 100 \left( \frac{50}{0,9} ( \text{IEU} - 0.1 ) \right) \quad (6)$$

Dimana :

Rata – rata konsentrasi NO<sub>2</sub> : Nilai rata – rata konsentrasi NO<sub>2</sub>

Rata – rata konsentrasi SO<sub>2</sub> : Nilai rata – rata konsentrasi SO<sub>2</sub>

Baku Mutu EU NO<sub>2</sub> : 40 μg / m<sup>3</sup>

Baku Mutu EU SO<sub>2</sub> : 40 μg / m<sup>3</sup>

Berikut ini merupakan tabel kategori Indeks Kualitas Udara berdasarkan peraturan yang ada:

Tabel 2.4 Kategori IKU sesuai Permen LHK No. 27 Tahun 2021

| No | Kategori      | Angka Rentang        |
|----|---------------|----------------------|
| 1  | Sangat Baik   | $90 \leq x \leq 100$ |
| 2  | Baik          | $70 \leq x < 90$     |
| 3  | Sedang        | $50 \leq x < 70$     |
| 4  | Kurang        | $25 \leq x < 50$     |
| 5  | Sangat Kurang | $0 \leq x < 25$      |

### 2.1.5 Klasifikasi Musim Meteorologis

Klasifikasi musim meteorologis merupakan kerangka kerja standar global yang membagi tahun menjadi empat periode tiga bulanan untuk tujuan analisis data iklim yang konsisten: DJF, MAM, JJA, dan SON (National Centers for Environmental Information, 2023). Meskipun penamaan musim seperti Musim Dingin atau Musim Gugur dari belahan bumi lain tidak diterapkan secara harfiah, kerangka waktu ini sangat relevan dan diadopsi dalam penelitian iklim di Indonesia karena kesesuaiannya dengan siklus monsun. Di Indonesia, periode DJF (Desember-Januari-Februari) diidentifikasi sebagai puncak musim hujan bagi sebagian besar wilayah akibat aktifnya Monsun Asia yang basah. Sebaliknya, periode JJA (Juni-Juli-Agustus) adalah puncak musim kemarau yang disebabkan oleh pengaruh Monsun Australia yang kering. Sementara itu, periode MAM (Maret-April-Mei) dan SON (September-Oktober-November) dikenal sebagai musim peralihan atau pancaroba, yang menandai transisi antara kedua musim utama tersebut. Dengan demikian, klasifikasi ini berfungsi sebagai alat analisis temporal yang efektif untuk mengkaji variabilitas iklim di Indonesia. Penggunaan klasifikasi musim seperti ini sudah banyak di gunakan dalam penelitian-penelitian terkait musim sebelumnya.

### 2.1.6 ENSO (El Nino-Southern Oscillation)

El Nino-Southern Oscillation (ENSO) adalah fenomena iklim yang terjadi secara alami di Samudra Pasifik tropis, dengan dampak global terhadap cuaca dan ekosistem (Capotondi et al., 2015). Di Indonesia, ENSO memiliki pengaruh signifikan, terutama pada perubahan pola curah hujan, yang dapat menyebabkan kekeringan parah selama fase El Nino atau banjir saat fase La Nina. Fenomena ini juga memengaruhi sektor pertanian, sumber daya air, serta kesehatan masyarakat, mengingat fluktuasi cuaca ekstrem yang ditimbulkannya.

Kejadian El Nino dapat menyebabkan peningkatan polusi udara karena cuaca yang lebih kering dan panas, yang mengurangi sirkulasi udara dan memungkinkan polutan seperti debu dan gas berbahaya terperangkap lebih lama di atmosfer. Selain itu, kebakaran hutan dan pembakaran biomassa yang sering terjadi selama El Nino turut memperburuk kualitas udara. Sebaliknya, La Nina biasanya menyebabkan curah hujan yang lebih tinggi dan kelembaban yang lebih tinggi, yang dapat membantu membersihkan polutan dari udara. Dengan adanya hujan yang lebih sering, polutan seperti debu dan gas berbahaya cenderung turun ke tanah melalui proses presipitasi, sehingga kualitas udara cenderung membaik dan polusi menurun. Dikarenakan hujan sangat penting untuk mengurangi polusi partikulat di udara melalui proses yang dikenal sebagai efek pencucian (*washout*) (Guo et al., 2016).

Kejadian El Nino dan La Nina dapat diidentifikasi melalui anomali suhu permukaan laut (SST) di Samudra Pasifik tropis bagian tengah dan timur. Fenomena El Nino ditandai oleh kondisi SST yang lebih panas dari rata-rata normalnya, sedangkan La Nina ditandai oleh kondisi SST yang lebih dingin. Perbedaan suhu dari nilai normal inilah yang diukur secara kuantitatif menggunakan indeks standar global, yaitu Oceanic Nino Index (ONI). Tabel 2.4 berikut menunjukkan status El Nino atau La Nina berdasarkan nilai Oceanic Nino Index (ONI) yang dikeluarkan oleh National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Tabel 2.5 Nilai Oceanic Nino Index (ONI)

| Tahun | DJF  | JFM  | FMA  | MAM  | AMJ  | MJJ  | JJA  | JAS  | ASO  | SON  | OND  | NDJ  |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2019  | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.5  | 0.5  | 0.3  | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.5  | 0.5  |
| 2020  | 0.5  | 0.5  | 0.4  | 0.2  | -0.1 | -0.3 | -0.4 | -0.6 | -0.9 | -1.2 | -1.3 | -1.2 |
| 2021  | -1   | -0.9 | -0.8 | -0.7 | -0.5 | -0.4 | -0.4 | -0.5 | -0.7 | -0.8 | -1   | -1   |
| 2022  | -1   | -0.9 | -1   | -1.1 | -1   | -0.9 | -0.8 | -0.9 | -1   | -1   | -0.9 | -0.8 |
| 2023  | -0.7 | -0.4 | -0.1 | 0.2  | 0.5  | 0.8  | 1.1  | 1.3  | 1.6  | 1.8  | 1.9  | 2    |

Merah : Indikasi El Nino

Biru : Indikasi La Nina

Tabel 2.6 dibawah ini merupakan kriteria penentuan status ENSO berdasarkan kaidah yang dikeluarkan oleh BMKG.

Tabel 2.6 Kriteria Penentuan Status ENSO Berdasarkan Standar BMKG

| El Nino     |            | La Nina     |             |
|-------------|------------|-------------|-------------|
| Kriteria    | Nilai      | Kriteria    | Nilai       |
| Sangat Kuat | $\geq 2$   | Sangat Kuat | $\leq -2$   |
| Kuat        | 1.5 - 1.9  | Kuat        | -1.5 - -1.9 |
| Moderat     | 1.0 - 1.4  | Moderat     | -1.0 - -1.4 |
| Lemah       | 0.5 - 0.9  | Lemah       | -0.5 - -0.9 |
| Netral      | -0.5 - 0.5 |             |             |

Sehingga berdasarkan kriteria BMKG, rekapitulasi status ENSO dari tahun 2019 hingga 2023 adalah sebagai berikut:

- Tahun 2019 : El Nino Lemah
- Tahun 2020 : La Nina Moderat
- Tahun 2021 : La Nina Moderat
- Tahun 2022 : La Nina Lemah
- Tahun 2023 : El Nino Kuat



### 2.1.7 Metode Validasi Data Satelit dengan Data Pengamatan *In Situ*

Untuk melakukan validasi data satelit dengan data pengamatan *in situ* (stasiun pemantauan berbasis darat), diperlukan pendekatan statistik guna memastikan bahwa data satelit mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan. Data pengamatan yang diperoleh dari stasiun pemantauan darat (selanjutnya disebut data pengamatan *in situ*) digunakan sebagai referensi karena data tersebut mewakili kondisi lokal yang sebenarnya. Setelah itu, data satelit diproses untuk menyesuaikan resolusi spasial dan temporalnya agar sebanding dengan data pengamatan *in situ*. Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa skala ruang dan waktu dari data satelit selaras dengan data pengamatan *in situ*, sehingga memungkinkan perbandingan yang lebih akurat antara kedua jenis data.

Ada beberapa metode statistik yang umum dipakai untuk melakukan validasi data analisis data satelit terhadap data pengamatan *in situ*. Yang paling umum adalah melakukan perbandingan data satelit dengan data pengamatan *in situ* adalah seperti Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Bias (Mean Bias Error) serta Mean Absolute Percentage Error (MAPE) (Suryanto et al., 2023). Root Mean Square Error (RMSE) dapat menilai tingkat kesalahan data satelit dengan data pengamatan *in situ*. Mean Absolute Error (MAE) dapat mengukur rata-rata kesalahan absolut antara data satelit dan data pengamatan *in situ*, Bias (Mean Bias Error) dapat menilai deviasi rata-rata antara data satelit dan pengamatan *in situ* sedangkan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dapat Mengukur kesalahan relatif dalam bentuk persentase. Digunakan pula Koefisien Korelasi Pearson ( $r$ ) dan Koefisien Determinasi ( $R^2$ ) untuk melihat tingkat hubungan linear dan proporsi variasi yang dijelaskan antara data satelit dan data pengamatan *in situ*. Berikut ini merupakan persamaan yang dipakai dari metode metode diatas tadi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (O_t - S_t)^2}{n}} \quad (7)$$

Dimana:

$O_t$  : Data pengamatan *in situ*

$S_t$  : Data Satelit Sentinel 5P

n : Jumlah data

RMSE adalah indikator kesalahan absolut, semakin kecil nilai RMSE, semakin baik akurasi data satelit terhadap data observasi.

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |O_t - S_t|}{n} \quad (8)$$

Dimana:

$O_t$  : Data pengamatan *in situ*

$S_t$  : Data Satelit Sentinel 5P

n : Jumlah data

Semakin kecil nilai MAE, semakin baik akurasi prediksi data satelit terhadap data observasi.

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - S_t)}{n} \quad (9)$$

Dimana:

$O_t$  : Data pengamatan *in situ*

$S_t$  : Data Satelit Sentinel 5P

n : Jumlah data

Jika Bias = 0, berarti tidak ada bias antara nilai satelit dan nilai pengamatan *in situ*, ini berarti data satelit dapat menggambarkan kondisi nyata dengan akurasi yang sangat baik, meskipun dalam kenyataannya, ini sangat jarang karena adanya perbedaan metodologi pengukuran dan resolusi data.

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{(O_t - S_t)}{S_t} \right|}{n} \quad (10)$$

Dimana:

$O_t$  : Data pengamatan *in situ*

$S_t$  : Data Satelit Sentinel 5P

n : Jumlah data

Interpretasi dengan menggunakan MAPE adalah bila MAPE rendah maka menunjukkan bahwa data satelit mendekati nilai yang terukur terhadap data pengamatan *in situ*. Ini menunjukkan data satelit memiliki akurasi yang baik dalam mengukur nilai yang sesuai dengan data pengamatan *in situ*.

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - \overline{O_t})(S_t - \overline{S_t})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (O_t - \overline{O_t})^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^n (S_t - \overline{S_t})^2}} \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (O_t - S_t)^2}{\sum (O_t - \overline{O_t})^2} \quad (12)$$

Dimana:

$O_t$  : Data pengamatan *in situ*

$S_t$  : Data Satelit Sentinel 5P

$n$  : Jumlah data

$\overline{O_t}$  : Rata-rata data pengamatan *in situ*

$\overline{S_t}$  : Rata-rata data Satelit Sentinel 5P

$r$  memberikan gambaran seberapa baik data satelit dapat digunakan untuk memperkirakan atau menggantikan data *in situ*. Semakin tinggi nilai  $r$ , semakin baik tingkat keakuratan data yang dapat dilakukan menggunakan data satelit. Sedangkan  $R^2$  yang tinggi (mendekati 1) menunjukkan bahwa data satelit adalah representasi yang baik dari data pengamatan *in situ* begitu pula sebaliknya bila  $R^2$  bernilai rendah berarti data menunjukkan perbedaan yang signifikan antara pengukuran satelit dan pengamatan *in situ*.

Dalam penelitian ini, interpretasi terhadap besarnya koefisien korelasi ( $r$ ) mengacu pada kriteria yang dikemukakan oleh Evans (1996). Nilai korelasi dalam rentang 0,00–0,19 menunjukkan hubungan yang sangat lemah (*very weak*), 0,20–0,39 menunjukkan hubungan lemah (*weak*), 0,40–0,59 menunjukkan hubungan sedang (*moderate*), 0,60–0,79 menunjukkan hubungan kuat (*strong*), dan 0,80–1,00 menunjukkan hubungan yang sangat kuat (*very strong*) (Wuensch & Evans, 1996). Dengan berpedoman pada kriteria ini, penafsiran hasil analisis korelasi dalam penelitian dapat dilakukan secara lebih terstruktur dan sesuai dengan rujukan.

Berdasarkan hasil validasi yang telah mengukur tingkat kesesuaian dan besaran error data satelit terhadap data *in situ*, tahap selanjutnya adalah proses koreksi. Proses ini bertujuan untuk mengurangi bias dan meningkatkan akurasi data satelit dengan menggunakan model regresi linear sederhana (Haack & Rafter, 2010). Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan hubungan linear satu parameter antara dua variabel.

Data satelit akan digunakan sebagai prediktor (variabel X), sementara data *in situ* sebagai respons (variabel Y). Dari analisis ini, akan diperoleh sebuah persamaan koreksi ( $Y = a + bX$ ) yang kemudian diaplikasikan pada seluruh data satelit untuk mendapatkan data turunan yang telah terkoreksi dan lebih andal. Berikut ini persamaan yang digunakan:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i \quad (13)$$

Dimana

- $y_i$  : Nilai pengamatan *in situ* pada lokasi/waktu ke-(i) (data acuan)
- $x_i$  : Nilai satelit pada lokasi/waktu ke-(i) (data pengukuran satelit)
- $\alpha$  : Intersep (intercept), yaitu nilai  $y$  ketika  $x$  bernilai nol
- $\beta$  : Koefisien regresi (slope), yang menunjukkan besarnya perubahan pada  $y$  untuk setiap satu unit perubahan pada  $x$
- $\epsilon_i$  : Error atau sisaan (residual), yaitu selisih antara nilai  $Y$  observasi dan nilai  $y$  yang diprediksi oleh model.

### 2.1.8 Validasi dan Pembersihan Data *In Situ* Menggunakan Pendekatan Interquartile Range (IQR)

Validasi dan pembersihan data *in situ* menggunakan pendekatan Interquartile Range (IQR) merupakan langkah krusial untuk memastikan kualitas data referensi. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menangani nilai pencilan (*outlier*) atau data anomali yang mungkin timbul akibat kesalahan sensor, pengaruh lingkungan, atau kesalahan pencatatan. Dengan menyaring nilai-nilai ekstrem yang tidak wajar ini, sehingga dapat menjamin bahwa data *in situ* yang digunakan benar-benar representatif dan tidak akan menimbulkan bias pada tahap analisis

selanjutnya, seperti saat validasi terhadap data satelit. Data pencilan tersebut diidentifikasi menggunakan metode ini terhadap seluruh set data selama lima tahun (Vinutha et al., 2018).

Metode ini bekerja dengan menetapkan ambang batas statistik berdasarkan sebaran data. Pertama, dihitung nilai Kuartil 1 (Q1) dan Kuartil 3 (Q3) untuk mendapatkan nilai IQR (selisih Q3 dan Q1). Selanjutnya, batas bawah ( $Q1 - 1,5 * IQR$ ) dan batas atas ( $Q3 + 1,5 * IQR$ ) ditentukan sebagai rentang nilai yang dapat diterima. Data observasi yang berada di luar rentang ini akan ditandai sebagai outlier dan akan ditinjau lebih lanjut, baik untuk dihapus maupun diperiksa validitasnya, sehingga memastikan dataset akhir yang digunakan bersih dan andal. Dalam penelitian ini outlier dihapus dan tidak digunakan dalam proses pengolahan data.

## 2.2 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu mengenai studi konsentrasi unsur GRK dan polutan dari data satelit di wilayah Jabodetabek seperti tabel 2.7 berikut:

Tabel 2.7 Tabel Penelitian Terdahulu

| No | Peneliti                             | Tujuan                                                                                                                                                                                                     | Hasil Penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | M. Nishihashi, H. Mukai at al (2019) | Memantau emisi gas rumah kaca (GHGs) dan polutan udara di kawasan Jakarta megapolitan (Jabodetabek) dengan membangun tiga buat stasiun pemantauan GRK dan polutan yang komprehensif di wilayah Jabodetabek | Penelitian ini mengidentifikasi variasi yang jelas semua parameter GRK dan polutan di wilayah masing masing. Data yang diperoleh memberikan wawasan mengenai dampak emisi GRK terhadap kualitas udara di Jabodetabek dan membantu memperkirakan kontribusi berbagai sumber emisi dalam kawasan megapolitan ini.<br><br>Penelitian ini hanya terbatas pada pengamatan berbasis darat saja. |
| 2  | S. Kusumangtyas, K. Tonokura (2024)  | Menyelidiki perubahan konsentrasi ozon ( $O_3$ ) permukaan dari stasiun pemantauan kualitas udara di Jakarta Greater                                                                                       | Sensitivitas pembentukan ozon dengan menggunakan data satelit menunjukkan bahwa penurunan sedikit $NO_2$ dan peningkatan HCHO berkontribusi pada penurunan $O_3$ di Jakarta. Rasio HCHO                                                                                                                                                                                                   |

| No | Peneliti                                  | Tujuan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Hasil Penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                           | Area (JGA), serta untuk mengevaluasi kontribusi faktor meteorologis dan antropogenik terhadap fluktuasi konsentrasi ozon di wilayah perkotaan Jakarta (2010–2019) dan wilayah pedesaan Bogor (2017–2019). Penelitian ini juga memakai data OMI sebagai inputan untuk menganalisis Ozon ( $O_3$ ) di wilayah Jabodetabek | terhadap $NO_2$ (FNR) di Jakarta adalah 3.7, sedangkan di Bogor rasio FNR lebih tinggi, yaitu 4.4, yang kemungkinan disebabkan oleh emisi alami prekursor ozon dan faktor meteorologis yang memperbesar konsentrasi ozon.<br><br>Penelitian ini belum membandingkan data OMI dengan data pengamatan dari Stasiun Pemantauan Darat |
| 3  | M. Kazemi Garajeh, G. Laneve et al (2023) | Menilai kesesuaian produk polusi udara (AP) dari Sentinel-5 berbasis platform Google Earth Engine (GEE) untuk memantau polutan udara, termasuk $CO$ , $NO_2$ , $SO_2$ , dan $O_3$ di kota Arak, Iran, pada periode 2018 hingga 2019                                                                                     | Penggunaan data Sentinel-5 yang digabungkan dengan pendekatan otomatis berbasis GEE dapat memberikan hasil yang lebih baik, sehingga lebih efektif untuk pemetaan dan pemantauan polusi udara<br><br>Hanya terbatas pada produk dari Sentinel 5 P                                                                                 |
| 4  | (Qu et al., 2013)                         | Membandingkan konsentrasi kolom karbon dioksida ( $CO_2$ ) atmosfer yang diamati oleh Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) dengan pengukuran dari stasiun pemantauan darat                                                                                                                                      | Penelitian ini menunjukkan bahwa GOSAT dapat memberikan data yang mendekati pengukuran di stasiun tanah<br><br>Hanya terbatas pada produk GOSAT                                                                                                                                                                                   |

### 2.3 Kerangka Teoritis

Kerangka teoritis disusun dengan tujuan menghubungkan teori-teori yang berkaitan dengan penelitian dan mengaitkan teori teori tersebut agar dapat diaplikasikan dalam penelitian ini. Penelitian ini memfokuskan pada bagaimana data satelit yang ada dapat memberikan gambaran tentang GRK dan polutan yang ada di Jabodetabek. Penelitian ini juga mengkaji proses validasi data satelit mengenai GRK dan polutan yang ada dengan data dari stasiun pemantauan yang berada di darat, khususnya di wilayah Jabodetabek.

Kerangka teoritis dalam penelitian ini membahas masalah megapolitan. Megapolitan menjadi lokasi penelitian dikarenakan wilayah ini merupakan sebuah perkotaan padat penduduk dengan aktifitas tinggi yang menghasilkan GRK dan polutan. Selanjutnya data GRK dan polutan yang dihasilkan dari daerah ini merupakan fokus penelitian, data tersebut nantinya di kumpulkan serta dianalisis lebih lanjut. Data pengamatan *in situ* adalah data hasil pengamatan langsung atau pengukuran di lapangan. Data pengamatan *in situ* didapatkan dari tiga buah stasiun pemantauan darat yang berada di lokasi penelitian ini. Data satelit berasal dari satelit-satelit yang menghasilkan produk yang berkaitan dengan GRK dan polutan. Kedua data tersebut selanjutnya di analisis dengan metode statistik seperti Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Bias (Mean Bias Error), korelasi Pearson ( $r$ ) dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) untuk mengevaluasi performa data satelit dengan data pengamatan *in situ*. Selanjutnya GIS digunakan untuk mengolah, menganalisis, dan memvisualisasikan hasil integrasi data agar nantinya menghasilkan peta spasial yang membantu dalam memahami distribusi GRK dan polutan.

### 2.4 Kerangka Konseptual

Konsep utama dalam penelitian ini adalah validasi data satelit GRK dan polutan terhadap data stasiun pemantauan berbasis darat (*ground-based monitoring*) untuk menghasilkan informasi GRK dan polutan yang lebih akurat.

Kawasan Megapolitan Jabodetabek menjadi prioritas penelitian karena tingginya konsentrasi GRK dan polutan yang berdampak pada kualitas udara dan

kesehatan masyarakat. Hal ini didasarkan pada kawasan ini merupakan kawasan dengan urbanisasi yang pesat, aktivitas transportasi, industri, dan pemukiman yang tinggi serta pastinya memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi GRK dan polutan udara. Parameter yang dikaji terdiri dari dua macam, yang pertama merupakan polutan terdiri dari karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) dan yang kedua merupakan gas rumah kaca (GRK) terdiri dari metana (CH<sub>4</sub>) serta ozon (O<sub>3</sub>).

Data satelit yang dikumpulkan divalidasi menggunakan data pengamatan *in situ* dari stasiun pemantauan berbasis darat. Tujuannya adalah untuk memastikan akurasi dan keandalan data yang dihasilkan dari citra satelit. Analisis statistik yang digunakan Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Bias (Mean Bias Error), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), korelasi Pearson ( $r$ ), dan koefisien determinasi ( $R^2$ ).

Hasil akhir merupakan peta konsentrasi polutan dan GRK dari data satelit dengan sebelumnya dilakukan validasi dengan data pengamatan *in situ* untuk wilayah Jabodetabek.

## 2.5 Hipotesis

Hipotesis yang muncul dalam penelitian ini adalah terdapatnya korelasi yang signifikan antara data polutan dan GRK yang diperoleh dari produk satelit yang ada dengan pengamatan *in situ* untuk tiga titik pengamatan yang ada di wilayah Jabodetabek. Sehingga hasil tersebut dapat digunakan sebagai dasar validasi dan kalibrasi produk satelit kedepannya. Walaupun ada kekurangan dikarenakan data satelit yang mempunyai resolusi menengah dan bersifat global sedangkan data *in situ* bersifat lokal. Hipotesis lainnya adalah terjadinya penurunan konsentrasi polutan dan GRK selama musim penghujan dibandingkan musim kemarau. Selain itu, penurunan polutan dan GRK juga lebih signifikan pada tahun dengan kondisi La Nina dibandingkan dengan tahun yang dipengaruhi oleh El Nino di Indonesia.



## **BAB III**

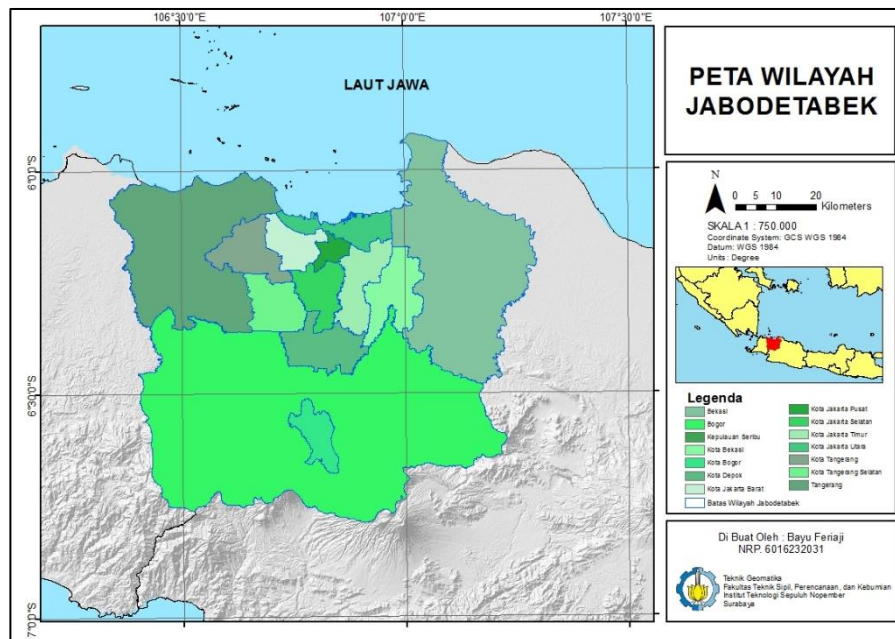
### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Desain Penelitian**

Penelitian ini masuk dalam penelitian kuantitatif. Penggunaan data satelit maupun data pengamatan *in situ* yang berupa konsentrasi polutan dan GRK dalam bentuk nilai numerik, yang dapat dianalisis secara statistik. Proses validasi yang dilakukan antara data satelit dan data pengamatan *in situ* juga melibatkan analisis kuantitatif untuk mengevaluasi performa data satelit dengan data pengamatan *in situ*. Pendekatan studi kasus pada penelitian ini menjadi metode yang paling sesuai karena hanya fokus pada wilayah Jabodetabek, dengan menggunakan tiga lokasi data *in situ* serta beberapa data produk satelit yang menghasilkan data polutan dan GRK. Penelitian ini juga bersifat deduktif karena memberikan kerangka yang sistematis dan berbasis data untuk mencari sejauh mana nilai keakuratan data satelit terhadap data pengamatan *in situ* untuk data polutan maupun GRK.

#### **3.2 Lokasi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di wilayah Jabodetabek, yang meliputi Provinsi DKI Jakarta, Kota dan Kabupaten Bekasi, Kota dan Kabupaten Bogor, Kota Depok, Kota dan Kabupaten Tangerang, serta Kota Tangerang Selatan. Wilayah Kabupaten Administrasi Kepulauan Seribu dikecualikan dari cakupan penelitian ini. Keputusan ini diambil berdasarkan pertimbangan karakteristik geografisnya yang terdiri dari gugusan pulau-pulau kecil, yang berpotensi menimbulkan bias dan anomali dalam analisis spasial secara keseluruhan. Lokasi penelitian di tunjukkan pada gambar 3.1. Kawasan Jabodetabek memiliki koordinat geografis diantara sekitar 106°21' BT hingga 107°12' BT dan sekitar 5°48' LS hingga 6°36' LS. Kawasan jabodetabek memiliki luas sekitar 7.076,31 km<sup>2</sup>.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

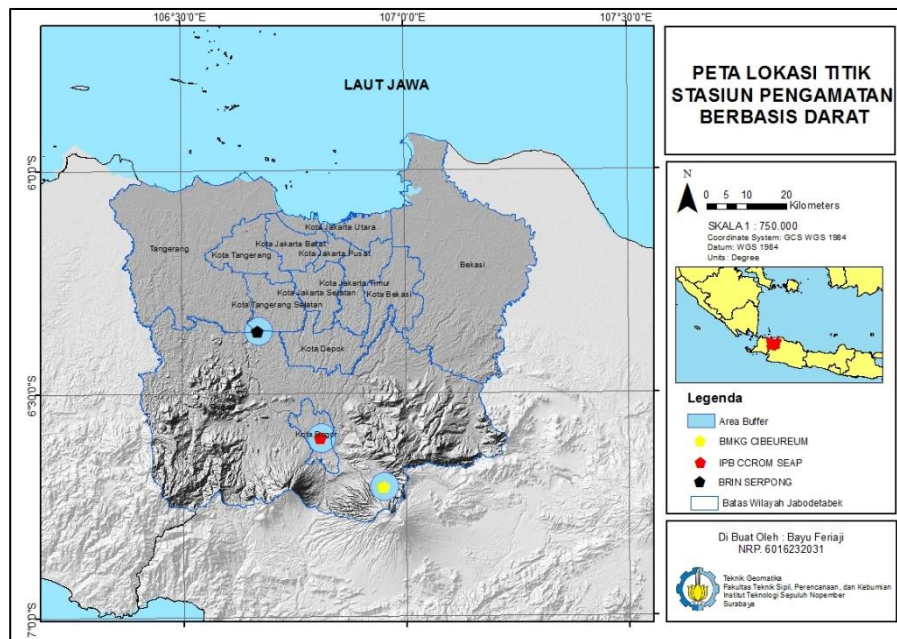
### 3.3 Teknik Pengumpulan Data

#### 3.3.1 Instrumen Penelitian

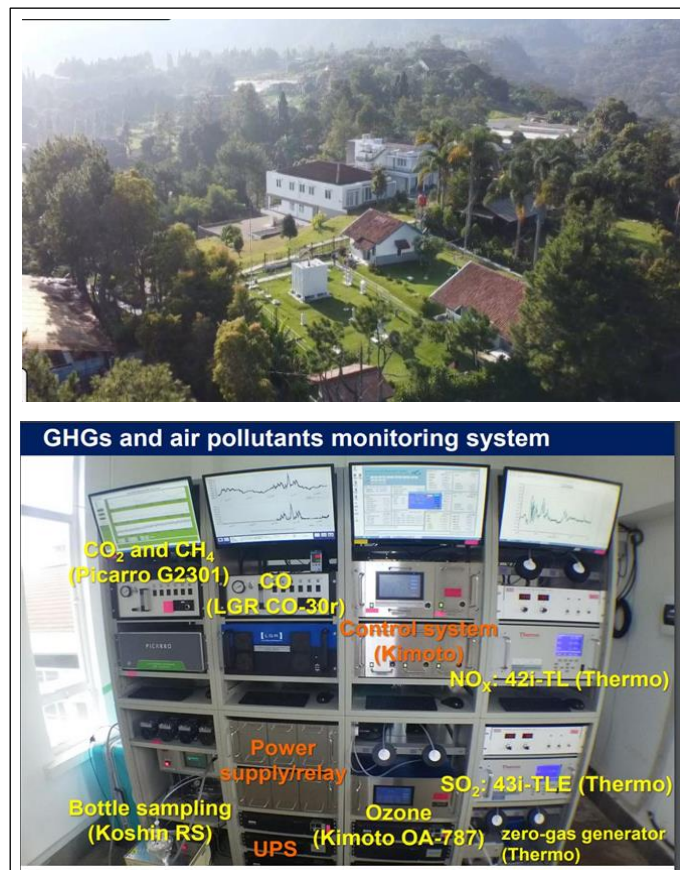
Instrumen pada penelitian ini adalah tiga lokasi Stasiun Pemantau Polutan dan GRK. Setiap parameter polutan dan GRK mempunyai analyzernya masing - masing. Sedangkan data citra satelit diunduh dari situs penyedia data satelit yang terpercaya. Berikut ini adalah tabel daftar Stasiun Pemantau Polutan dan GRK yang di gunakan sebagai validasi.

Tabel 3.1 Daftar Stasiun Pemantau Polutan dan GRK di wilayah Jabodetabek

| Nama Stasiun                  | Afiliasi       | Lintang | Bujur     | Ketinggian | Karakteristik  |
|-------------------------------|----------------|---------|-----------|------------|----------------|
| Pos Polusi Udara Cibeureum    | BMKG           | 6,71° S | 106,95° E | 1.160 Mdpl | Area Rural     |
| IPB CCROM Baranangsiang       | IPB CCROM SEAP | 6,60° S | 106,81° E | 266 Mdpl   | Area Urban     |
| Laboratorium Geostech Serpong | BRIN Serpong   | 6,36° S | 106,67° E | 63 Mdpl    | Area Sub Urban |



Gambar 3.2 Lokasi Stasiun Pemantau Polutan dan GRK di Jabodetabek



Gambar 3.3 Pos Polusi Udara Cibeureum (BMKG Cibeureum) (atas) serta Instrumen Pemantau Polutan dan GRK di BRIN Serpong (bawah)

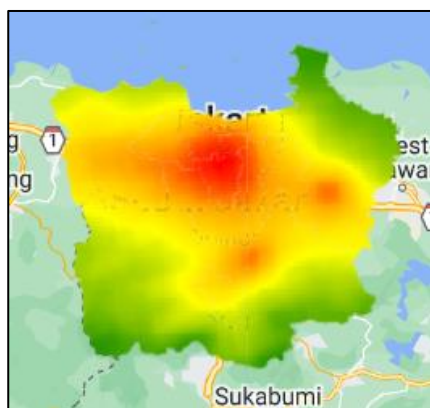
### 3.3.2 Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data diambil dari server yang dimiliki oleh BMKG. Berikut ini merupakan dataset dari data pengamatan *in situ* dari Stasiun Pengamatan Polutan dan GRK yang digunakan.

Tabel 3.2 Dataset Parameter GRK dan Polutan

| Nama Parameter                       | Satuan | Resolusi Data | Deskripsi Data                                                                                             |
|--------------------------------------|--------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Metana (CH <sub>4</sub> )            | ppm    | 1 Menit       | Rata-rata konsentrasi CH <sub>4</sub> yang telah terkalibrasi dalam satu menit dan setelah koreksi uap air |
| Ozon (O <sub>3</sub> )               | ppb    | 1 Menit       | Rata-rata konsentrasi O <sub>3</sub> , dengan alat yang terkalibrasi                                       |
| Karbon Monoksida (CO)                | ppb    | 1 Menit       | Rata-rata konsentrasi CO yang telah terkalibrasi dalam satu menit dan setelah koreksi uap air              |
| Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )   | ppb    | 1 Menit       | Rata-rata konsentrasi SO <sub>2</sub> yang telah terkalibrasi dalam satu menit                             |
| Nitrogen Dioksida (NO <sub>2</sub> ) | ppb    | 1 Menit       | Rata-rata konsentrasi CO yang telah terkalibrasi dalam satu menit                                          |

Sedangkan data citra satelit diproses serta diolah dengan menggunakan platform Google Earth Engine. Data yang dipakai merupakan data dari rentang waktu selama lima tahun dimulai tahun 2019 hingga tahun 2023.



Gambar 3.4 Contoh Citra NO<sub>2</sub> Dari Sentinel 5P Tahun 2023 dari GEE

### 3.4 Teknik Analisis Data

#### 3.4.1 Metode Analisis Data

Analisis statistik, digunakan untuk mencari hubungan antara data satelit dengan data pengamatan *in situ*. Penggunaan metode statistik dalam melakukan validasi dapat memberikan gambaran dalam menilai akurasi dan kualitas data satelit dibandingkan dengan data *in situ*. RMSE, MAE, dan Bias membantu dalam menilai besarnya kesalahan dan arah perbedaan antara data satelit dan data pengamatan *in situ*. MAPE memberikan indikasi yang jelas dalam persentase seberapa besar kesalahan relatif terhadap data *in situ*. Serta Korelasi Pearson ( $r$ ) dan  $R^2$  memberikan gambaran tentang seberapa baik data satelit dapat menggambarkan atau memprediksi data *in situ*. Data di olah dengan bantuan perangkat lunak statistik dan analisis data seperti Phyton.

Analisi spasial digunakan dalam menganalisis distribusi paramater polutan dan GRK produk dari Sentinel 5P dalam area Jabodetabek. Analisis dilakukan dengan secara temporal dengan membuat analisis berdasarkan musim dan tahun. Membandingkan antara musim penghujan dan kemarau serta tahun dengan La Nina maupun El Nino.

#### 3.4.2 Prosedur Analisis

Langkah pertama dalam analisis adalah pengumpulan data baik itu data satelit maupun data pengamatan *in situ*. Setelah itu, data satelit dan data pengamatan *in situ* akan disesuaikan agar memiliki resolusi spasial dan temporal yang serupa. Proses ini penting untuk memastikan bahwa kedua dataset dapat dibandingkan

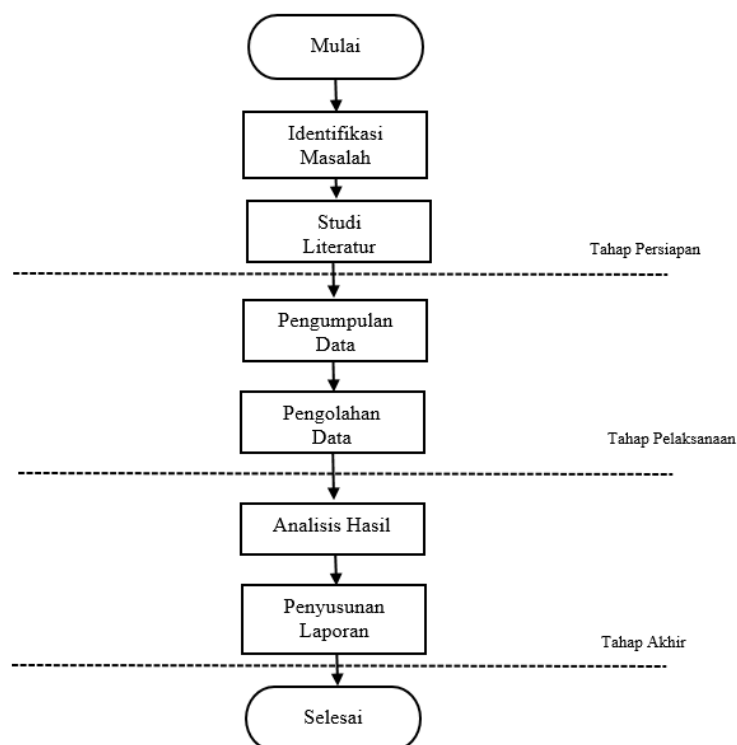
secara akurat. Setelah itu, dilakukan analisis statistik untuk mengevaluasi keandalan data satelit.

Perangkat lunak yang digunakan:

1. Google Earth Engine digunakan untuk pemrosesan dan analisis data citra satelit Sentinel 5P.
2. QGis digunakan untuk visualisasi data spasial serta penyusunan peta tematik.
3. Python digunakan untuk perhitungan analisis statistik lanjutan
4. Ms. Excel digunakan untuk perhitungan analisis statistik dasar serta pengolahan data sederhana.
5. Ms. Word digunakan sebagai penyusunan naskah dan penulisan laporan penelitian.

### 3.5 Tahapan Pelaksanaan

Secara umum, tahapan pelaksanaan penelitian dibagi menjadi tiga tahap yaitu tahap persiapan, tahap pelaksanaan, dan tahap akhir seperti ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram Alir Tahapan Pelaksanaan

Berikut penjelasan dari diagram alir penelitian tesis di atas:

#### 1. Identifikasi Masalah

Kegiatan ini dilakukan dengan menganalisis permasalahan yang berkaitan dengan polutan dan GRK. Mempelajari tentang produk - produk satelit yang sekiranya bisa digunakan dalam penelitian ini serta teknik dalam melakukan validasi antara data satelit dengan data pengamatan *in situ*.

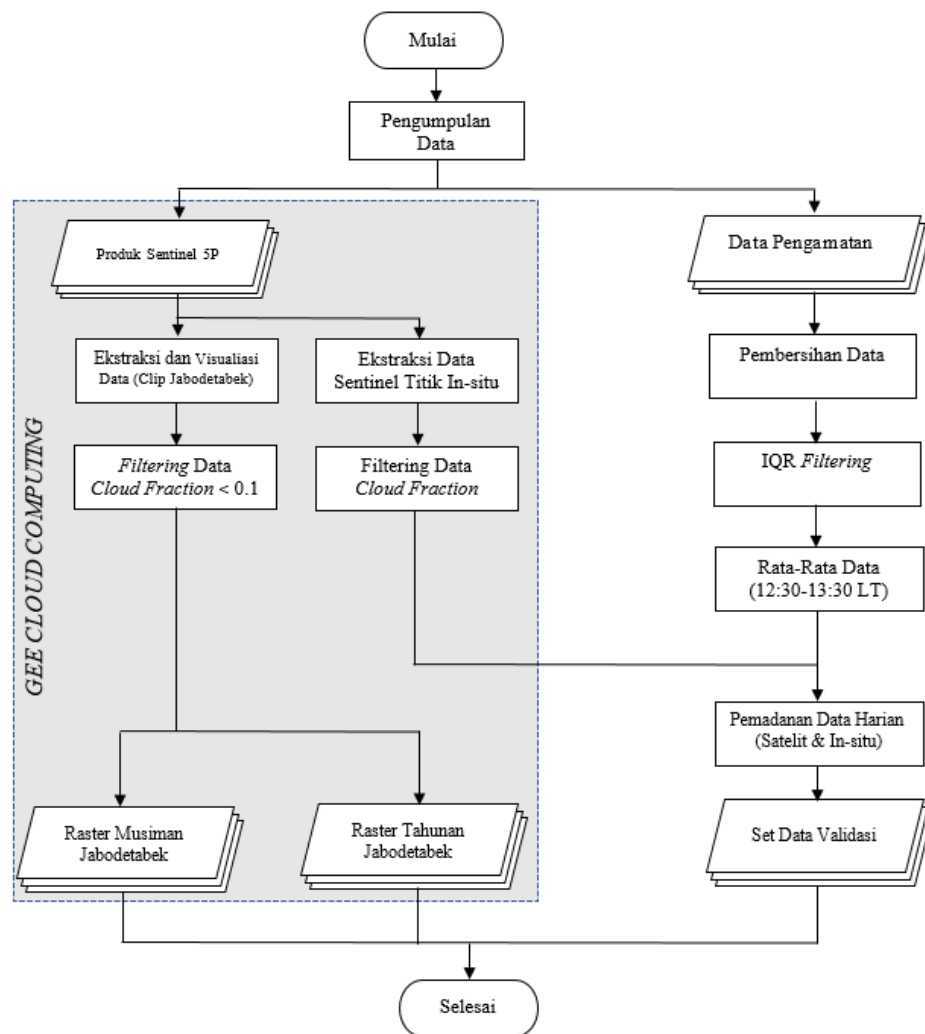
#### 2. Studi Literatur

Tahap studi literatur dilakukan untuk menguasai materi dan pemahaman dalam mendukung kegiatan penelitian yang berkaitan pengolahan data satelit polutan dan GRK dengan menggunakan platform Google Earth Engine. Mempelajari teknik statistik dalam melakukan uji validasi data satelit dengan data pengamatan *in situ*. Dalam tahap ini juga mempelajari tentang kaitan antara polutan dan GRK dengan faktor meteorologis yang dapat mempengaruhinya.

#### 3. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data adalah dengan mengumpulkan data semua parameter polutan dan GRK dari tiga stasiun pemantauan darat. Melakukan proses *filtering data* data agar data yang digunakan memiliki kualitas yang baik. Data yang lolos *quality control* kemudian dipadukan dengan data satelit, yang mencakup parameter polutan dan GRK pada periode dan titik lokasi yang sama.

Pengumpulan data satelit menggunakan platform Google Earth Engine. Data satelit yang digunakan dalam kurun waktu lima tahun untuk area Jabodetabek. Dalam pengumpulan data, adapun langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:



Gambar 3.6 Diagram Alir Tahapan Pengumpulan Data

Adapun tahap pengumpulan data sebagai berikut:

- Pengumpulan data berupa produk satelit Sentinel 5P dan data pengamatan *in situ*
- Ekstraksi dan Visualiasi Data (Clip Jabodetabek) adalah melakukan ekstraksi data semua parameter dari produk Sentinel 5P. Nilai dari satelit Sentinel 5P di konversi dulu ke satuan Part Per Billion (ppb) agar menyamakan satuan dengan data *in situ*. Data Sentinel-5P dilakukan resampling ke resolusi spasial  $3.500 \times 3.500$  meter dari resolusi bawaan GEE sebesar 0,01 derajat, dengan tujuan untuk mendekati resolusi asli data Sentinel-5P.



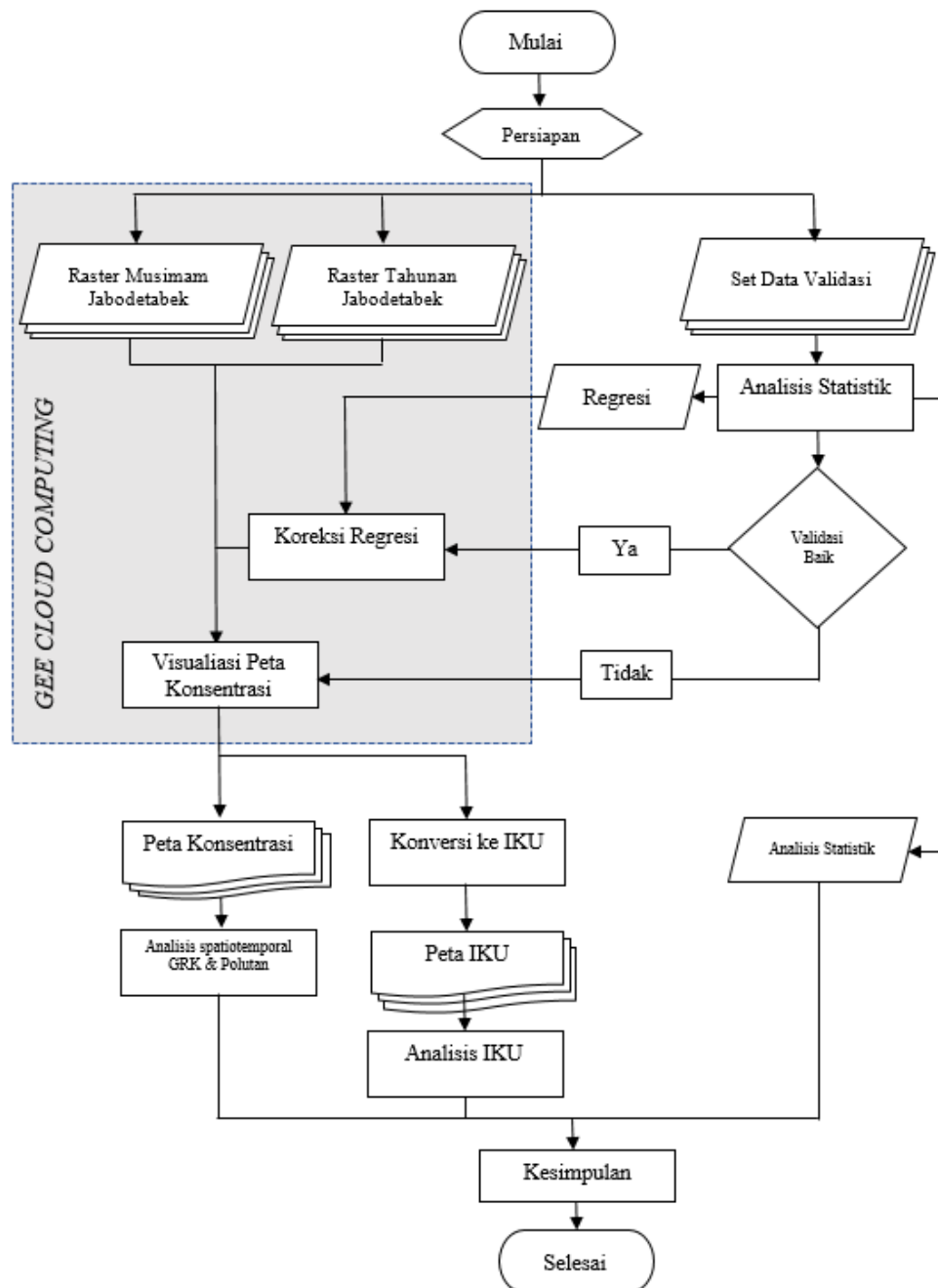
- c. Ekstraksi Data Sentinel pada Titik *In Situ* dilakukan pada koordinat titik pengamatan, dengan sebelumnya memberikan buffer 3.500 meter, untuk kemudian digunakan dalam validasi data satelit terhadap data *in situ*. Proses buffer dimaksudkan untuk menyelaraskan data *in situ* yang bersifat titik dengan data satelit Sentinel-5P yang bersifat area. Dengan mengambil rata-rata nilai piksel satelit sebesar area 3500 meter yang mendekati piksel asli dari satelit tersebut.
- d. Filtering Data Cloud Fraction  $< 0.1$  ini digunakan untuk melakukan penyaring citra satelit yang akan dipakai. Nilai *cloud fraction* dapat dimanfaatkan untuk penyaringan data satelit, contohnya dalam menyeleksi citra bebas awan atau mengurangi pengaruh gangguan awan (Latsch et al., 2022). Proses ekstraksi data satelit pada penelitian ini menggunakan batas *cloud fraction*  $< 0,1$  untuk menghasilkan raster konsentrasi Jabodetabek pada skala musiman maupun tahunan. Produk  $\text{NO}_2$  memiliki data *cloud fraction*, sehingga dalam penelitian ini *cloud fraction* dari produk  $\text{NO}_2$  digunakan sebagai acuan untuk semua parameter.
- e. Filter Data Cloud Fraction ini meliputi ekstraksi data satelit dari lokasi yang sama dengan titik *in situ*, di mana setiap rekaman data yang berhasil diekstrak akan dilengkapi dengan nilai *cloud fraction* yang sesuai.
- f. Data Raster Musiman dan data Raster Tahunan Jabodetabek diperoleh dengan merata-ratakan data konsentrasi harian. Untuk data musiman, setiap raster merupakan hasil rata-rata selama satu musim spesifik. Misalnya, raster DJF 2019 dihitung dari rata-rata konsentrasi harian periode Desember 2018, Januari 2019, dan Februari 2019. Sementara itu, raster tahunan merupakan nilai rata-rata harian selama satu tahun penuh. Sebagai contoh, raster tahunan 2019 mencakup periode 1 Januari hingga 31 Desember 2019.
- g. Pembersihan Data ini merupakan proses penyaringan awal terhadap data pengamatan *in situ*. Proses ini meliputi eliminasi data yang rusak, bernilai negatif, data hasil kalibrasi, serta data yang tercatat selama terjadi gangguan instrumen (berdasarkan *logbook*)
- h. IQR Filtering adalah proses melakukan penyaring data pengamatan dengan metode IQR. Penyaringan ketat dilakukan pada data *in situ* dengan cara

hanya menyertakan nilai-nilai dalam rentang wajar dan membuang data pencilan (*outlier*).

- i. Rata-Rata Data (12:30-13:30 LT) merupakan tahap dimana data *in situ* harian difilter dengan menghitung nilai rata-ratanya pada rentang waktu spesifik, yaitu pukul 12:30 hingga 13:30 Waktu Lokal (LT). Pemilihan rentang waktu ini bertujuan untuk memastikan data darat selaras dengan waktu lintas (*overpass*) tipikal satelit Sentinel-5P di kawasan ekuator (Veefkind et al., 2012).
- j. Pemadanan Data Harian (Satelit & *In situ*) merupakan tahap yang bertujuan untuk menggabungkan dua set data yang telah disiapkan: data satelit Sentinel-5P yang diekstraksi menggunakan GEE dan data *in situ* yang telah melewati proses penyaringan ketat. Proses penggabungan ini dilakukan dengan mencocokkan data dari kedua sumber berdasarkan tanggal pengamatan yang sama.
- k. Set Data Validasi adalah produk akhir dari proses pemadanan data, yang terdiri dari pasangan nilai harian antara data satelit dan data pengamata *in situ*. Fungsinya adalah sebagai input utama untuk analisis statistik guna mengukur performa dan akurasi data satelit.
- l. Semua tahapan pengolahan data satelit dilakukan menggunakan *cloud platform* Google Earth Engine (GEE), sedangkan pengolahan data *in situ* (data pengamatan) dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python.

#### 4. Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian ini dirangkum secara visual dalam flowchart berikut:



Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Pengolahan Data

Adapun pengolahan data sebagai berikut:

- a. Data yang dipakai adalah data Raster Musiman serta Raster Tahunan Sentinel 5P untuk Jabodetabek serta Data Set Data Validasi data satelit dengan pengamatan *in situ*.

b. Analisis Statistik adalah tahap dimana mempunyai tujuan untuk menilai tingkat keandalan data satelit terhadap data *in situ*, dilakukan analisis statistik dalam tiga skenario. Ketiga skenario ini dibedakan berdasarkan penerapan filter *cloud fraction* yang berbeda, yaitu:

- Skenario 1 (Ketat): Hanya menggunakan citra satelit dengan nilai *cloud fraction*  $< 0.05$ .
- Skenario 2 (Standar): Menggunakan citra satelit dengan nilai *cloud fraction*  $< 0.1$ .
- Skenario 3 (Musiman): Menerapkan ambang batas dinamis berdasarkan musim:
  - Musim Hujan (DJF) : *Cloud fraction*  $< 0.2$
  - Musim Peralihan I & II (MAM & SON) : *Cloud fraction*  $< 0.1$
  - Musim Kemarau (JJA) : *Cloud fraction*  $< 0.05$

Skenario 3 ini dirancang dengan tujuan untuk tetap melakukan penyaringan data (*filtering*), namun di sisi lain juga berupaya mempertahankan jumlah data yang lebih banyak agar memadai untuk analisis.

Analisis statistik ini bertujuan untuk mengidentifikasi skenario *filtering* yang menghasilkan tingkat keandalan (korelasi) tertinggi antara data satelit dan data *in situ*. Apabila salah satu skenario menunjukkan korelasi yang kuat dan signifikan, hasil dari skenario tersebut akan menjadi dasar untuk mengoreksi data satelit. Namun, jika tidak ada satupun skenario yang menghasilkan korelasi yang memadai, data satelit akan digunakan sebagaimana adanya tanpa proses koreksi lebih lanjut.

- c. Koreksi Regresi dilakukan dalam melakukan koreksi data satelit dengan memasukan formula regresi yang telah di peroleh.
- d. Pada tahap Visualisasi Peta Konsentrasi, data satelit (baik yang telah terkoreksi maupun yang tidak) diekstrak dan diubah menjadi peta raster, di mana semua data tersebut telah difilter menggunakan kriteria *cloud fraction*  $< 0.1$ .

- e. Peta Konsentrasi merupakan hasil visualisasi peta parameter dari Sentinel 5P musiman dan tahunan selama 2019-2023 baik itu terkoreksi ataupun tidak.
- f. Analisis Spatiotemporal Polutan dan GRK ini mempunyai tujuan untuk memahami bagaimana sebaran dan konsentrasi polutan serta GRK berubah di seluruh wilayah Jabodetabek selama 2019-2023. Analisis ini menggunakan peta konsentrasi yang diturunkan dari data Sentinel-5P yang sebelumnya telah dibuat.
- g. Konversi ke Indeks Kualitas Udara (IKU) ini merupakan tahap konversi menjadi Indeks Kualitas Udara (IKU) bertujuan untuk menghasilkan peta tematik IKU tahunan yang menggambarkan nilai IKU di Jabodetabek.
- h. Peta IKU merupakan hasil dari pembuatan peta IKU.
- i. Analisis Indeks Kualitas Udara (IKU) dilakukan untuk mengkaji tren tahunan di tingkat kabupaten/kota serta untuk membandingkan hasilnya dengan data resmi dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK).

## 5. Analisis Hasil

Analisis hasil dalam penelitian ini mencakup tiga kajian utama. Pertama, dilakukan analisis terhadap hasil uji statistik untuk validasi data. Kedua, dianalisis pola spasial-temporal (ruang-waktu) dari sebaran polutan dan gas rumah kaca (GRK) di Jabodetabek secara musiman dan tahunan. Terakhir, dikonversi dan dianalisis pula Indeks Kualitas Udara (IKU) berdasarkan data satelit selama periode lima tahun (2019-2023).

## 6. Penyusunan Laporan

Dari hasil tersebut dilakukan penyusunan laporan sesuai format yang disetujui oleh ITS.

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN HASIL

#### 4.1 Analisis Stastistik

##### 4.1.1 Polutan

Subbab ini menyajikan analisis statistik komprehensif mengenai analisis statistik antara pengukuran berbasis satelit dan pengukuran berbasis darat (*in situ*) untuk konsentrasi CO, NO<sub>2</sub>, dan SO<sub>2</sub>. Indikator statistik yang digunakan meliputi koefisien korelasi ( $r$ ), koefisien determinasi ( $R^2$ ), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Bias, Mean Absolute Percentage Error (MAPE), serta persamaan regresi.

Analisis ini dilakukan dengan membagi data ke dalam lima kelompok berdasarkan periode waktu. Empat kelompok pertama merupakan analisis data secara spesifik untuk setiap musim, yaitu DJF (Desember-Januari-Februari), MAM (Maret-April-Mei), JJA (Juni-Juli-Agustus), dan SON (September-Oktober-November). Adapun kelompok kelima, yang ditandai sebagai 'All', adalah analisis gabungan yang menggunakan keseluruhan data dalam satu tahun penuh.

Tiga skenario *filtering* data dengan ambang batas *cloud fraction* pada Google Earth Engine diterapkan untuk menilai sensitivitas kualitas data satelit. Skenario pertama menggunakan filter dengan memilih hanya citra yang memiliki *cloud fraction*  $< 0,05$  (Cloud Fraction  $< 0,05$ ). Skenario kedua menggunakan *cloud fraction*  $< 0,1$  (Cloud Fraction  $< 0,1$ ). Skenario terakhir adalah filter dengan batas ambang berdasarkan musim dimana citra DJF menggunakan *cloud fraction*  $< 0,2$ , citra MAM serta SON menggunakan *cloud fraction*  $< 0,1$  sedangkan citra di JJA menggunakan *cloud fraction*  $< 0,05$ .

Kinerja statistik dari masing-masing parameter dapat dijabarkan sebagai berikut:

Tabel 4.1 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi CO

|                                | Musim | n   | r    | R <sup>2</sup> | RMSE  | MAE   | Bias    | MAPE  | REGRESI                   |
|--------------------------------|-------|-----|------|----------------|-------|-------|---------|-------|---------------------------|
| Cloud Fraction < 0,05          | DJF   | 6   | 0,86 | 0,74           | 27,09 | 23,33 | -4E-14  | 18,13 | y = -103,30 + 3,94x       |
|                                | MAM   | 22  | 0,38 | 0,15           | 68,99 | 52,13 | -2E-14  | 22,88 | y = -19,87 + 3,31x        |
|                                | JJA   | 23  | 0,56 | 0,32           | 43,68 | 37,59 | 1,5E-14 | 19,72 | y = 6,60 + 2,97x          |
|                                | SON   | 19  | 0,55 | 0,30           | 94,10 | 65,21 | -2E-14  | 22,46 | y = -17,75 + 3,24x        |
|                                | All   | 70  | 0,61 | 0,38           | 69,04 | 49,84 | -4E-15  | 22,90 | y = -30,25 + 3,40x        |
|                                |       |     |      |                |       |       |         |       |                           |
| Cloud Fraction < 0,1           | DJF   | 12  | 0,87 | 0,76           | 36,38 | 28,75 | 5,9E-15 | 19,90 | y = -206,92 + 5,88x       |
|                                | MAM   | 38  | 0,45 | 0,20           | 69,14 | 56,99 | -3E-14  | 25,99 | y = -88,80 + 4,39x        |
|                                | JJA   | 62  | 0,63 | 0,40           | 59,33 | 46,15 | -7E-14  | 20,37 | y = -81,97 + 4,53x        |
|                                | SON   | 41  | 0,61 | 0,37           | 80,86 | 61,20 | -4E-14  | 22,28 | y = -29,64 + 3,44x        |
|                                | All   | 153 | 0,63 | 0,39           | 69,11 | 53,47 | -3E-14  | 23,97 | y = -38,12 + 3,69x        |
|                                |       |     |      |                |       |       |         |       |                           |
| Filtering dengan Batas Musiman | DJF   | 36  | 0,87 | 0,75           | 48,64 | 41,29 | 4,7E-14 | 22,32 | y = -239,72 + 6,70x       |
|                                | MAM   | 38  | 0,45 | 0,20           | 69,14 | 56,99 | -3E-14  | 25,99 | y = -88,80 + 4,39x        |
|                                | JJA   | 23  | 0,56 | 0,32           | 43,68 | 37,59 | 1,5E-14 | 19,72 | y = 6,60 + 2,97x          |
|                                | SON   | 41  | 0,61 | 0,37           | 80,86 | 61,20 | -4E-14  | 22,28 | y = -29,64 + 3,44x        |
|                                | All   | 138 | 0,67 | 0,44           | 68,09 | 53,47 | 1,2E-14 | 24,39 | <b>y = -56,38 + 3,88x</b> |

Di antara ketiga skenario *filtering*, metode *filtering* berbasis batas musiman memberikan kinerja yang paling seimbang dan konsisten untuk pengukuran CO di semua musim, dengan capaian nilai r (0,67) dan R<sup>2</sup> tertinggi secara keseluruhan (0,44) serta nilai RMSE dan MAPE yang masih dapat diterima. Sementara itu, *filtering* dengan *cloud fraction* <0,05 memang memberikan akurasi terbaik pada musim DJF, tetapi kinerjanya sangat bervariasi di musim lainnya. Oleh karena itu, pendekatan berbasis batas musiman direkomendasikan sebagai metode yang paling andal untuk mengintegrasikan data satelit dan data *in situ* CO. Model koreksi yang digunakan disajikan pada persamaan (10) berikut ini,

$$y = -56,38 + 3,88x \quad (14)$$

Di mana:

- y : Data CO terkoreksi (ppb)  
 x : Data CO satelit awal (ppb)



Tabel 4.2 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi NO<sub>2</sub>

|                                | Musim | n   | r    | R <sup>2</sup> | RMSE | MAE  | Bias    | MAPE  | REGRESI           |
|--------------------------------|-------|-----|------|----------------|------|------|---------|-------|-------------------|
| Cloud Fraction < 0,05          | DJF   | 22  | 0,69 | 0,48           | 1,64 | 1,12 | 1,1E-15 | 51,52 | y = 0,35 + 51,31x |
|                                | MAM   | 43  | 0,33 | 0,11           | 1,68 | 1,30 | -5E-17  | 39,15 | y = 3,12 + 12,80x |
|                                | JJA   | 35  | 0,74 | 0,55           | 1,04 | 0,84 | -3E-16  | 21,03 | y = 2,55 + 17,02x |
|                                | SON   | 25  | 0,72 | 0,51           | 1,69 | 1,20 | -1E-16  | 23,42 | y = 1,39 + 33,89x |
|                                | All   | 125 | 0,59 | 0,34           | 1,64 | 1,22 | -9E-16  | 36,38 | y = 2,37 + 20,94x |
|                                |       |     |      |                |      |      |         |       |                   |
| Cloud Fraction < 0,1           | DJF   | 36  | 0,60 | 0,36           | 1,79 | 1,43 | 0       | 62,25 | y = 1,03 + 43,28x |
|                                | MAM   | 80  | 0,68 | 0,46           | 1,86 | 1,45 | -4E-17  | 50,96 | y = 1,76 + 28,68x |
|                                | JJA   | 76  | 0,69 | 0,48           | 1,20 | 0,93 | -2E-16  | 21,76 | y = 2,90 + 15,38x |
|                                | SON   | 60  | 0,66 | 0,44           | 1,56 | 1,17 | -2E-16  | 23,97 | y = 2,43 + 23,63x |
|                                | All   | 252 | 0,65 | 0,43           | 1,68 | 1,25 | -3E-16  | 39,39 | y = 2,36 + 21,37x |
|                                |       |     |      |                |      |      |         |       |                   |
| Filtering dengan Batas Musiman | DJF   | 75  | 0,70 | 0,49           | 1,99 | 1,59 | 7,6E-16 | 56,62 | y = 1,42 + 37,00x |
|                                | MAM   | 80  | 0,68 | 0,46           | 1,86 | 1,45 | -4E-17  | 50,96 | y = 1,76 + 28,68x |
|                                | JJA   | 35  | 0,74 | 0,55           | 1,04 | 0,84 | -3E-16  | 21,03 | y = 2,55 + 17,02x |
|                                | SON   | 60  | 0,66 | 0,44           | 1,56 | 1,17 | -2E-16  | 23,97 | y = 2,43 + 23,63x |
|                                | All   | 250 | 0,66 | 0,44           | 1,81 | 1,39 | 0       | 43,30 | y = 2,02 + 26,35x |

Untuk NO<sub>2</sub>, metode yang sama dengan *filtering* berbasis batas musiman menghasilkan hasil yang paling baik, dengan nilai r (0,66) dan R<sup>2</sup> (0,44) tertinggi secara keseluruhan, serta RMSE (1,81) dan MAPE (43,30%) terendah. Hal ini menunjukkan bahwa penyesuaian batas nilai *cloud fraction* secara dinamis berdasarkan musim memberikan korelasi yang lebih akurat dan konsisten antara data NO<sub>2</sub> satelit dan *in situ* dibandingkan dengan penggunaan *cloud fraction* yang bernilai tetap. Sehingga model koreksi yang digunakan untuk koreksi NO<sub>2</sub> disajikan pada persamaan (11).

$$y = 2,02 + 26,35x \quad (15)$$

Di mana:

y : Data NO<sub>2</sub> terkoreksi (ppb)

x : Data NO<sub>2</sub> satelit awal (ppb)

Tabel 4.3 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi SO<sub>2</sub>

|                                | Musim | n   | r     | R <sup>2</sup> | RMSE | MAE  | Bias    | MAPE   | REGRESI           |
|--------------------------------|-------|-----|-------|----------------|------|------|---------|--------|-------------------|
| Cloud Fraction < 0,05          | DJF   | 11  | -0,16 | 0,03           | 0,63 | 0,41 | -4E-17  | 152,74 | y = 0,67 + -0,17x |
|                                | MAM   | 23  | 0,07  | 0,00           | 0,68 | 0,55 | -4E-17  | 152,77 | y = 0,97 + 0,09x  |
|                                | JJA   | 29  | 0,12  | 0,02           | 0,60 | 0,51 | 4E-16   | 77,83  | y = 1,16 + 0,14x  |
|                                | SON   | 26  | -0,02 | 0,00           | 0,55 | 0,41 | -2E-16  | 80,53  | y = 0,86 + -0,02x |
|                                | All   | 89  | 0,00  | 0,00           | 0,65 | 0,54 | 5E-18   | 127,54 | y = 0,99 + 0,00x  |
|                                |       |     |       |                |      |      |         |        |                   |
| Cloud Fraction < 0,1           | DJF   | 18  | 0,17  | 0,03           | 0,66 | 0,44 | 1,3E-16 | 137,54 | y = 0,49 + 0,20x  |
|                                | MAM   | 39  | -0,04 | 0,00           | 0,69 | 0,59 | -2E-16  | 154,99 | y = 1,09 + -0,07x |
|                                | JJA   | 73  | 0,02  | 0,00           | 0,71 | 0,59 | -4E-17  | 87,02  | y = 1,36 + 0,02x  |
|                                | SON   | 54  | -0,05 | 0,00           | 0,60 | 0,46 | -1E-16  | 94,42  | y = 0,89 + -0,05x |
|                                | All   | 184 | 0,00  | 0,00           | 0,72 | 0,61 | 6,8E-17 | 129,01 | y = 1,08 + 0,01x  |
|                                |       |     |       |                |      |      |         |        |                   |
| Filtering dengan Batas Musiman | DJF   | 43  | 0,14  | 0,02           | 0,83 | 0,68 | -4E-17  | 181,93 | y = 0,72 + 0,20x  |
|                                | MAM   | 39  | -0,04 | 0,00           | 0,69 | 0,59 | -2E-16  | 154,99 | y = 1,09 + -0,07x |
|                                | JJA   | 29  | 0,12  | 0,02           | 0,60 | 0,51 | 4E-16   | 77,83  | y = 1,16 + 0,14x  |
|                                | SON   | 54  | -0,05 | 0,00           | 0,60 | 0,46 | -1E-16  | 94,42  | y = 0,89 + -0,05x |
|                                | All   | 165 | 0,03  | 0,00           | 0,71 | 0,59 | -3E-16  | 138,51 | y = 0,95 + 0,04x  |

Untuk SO<sub>2</sub>, tidak ada skenario *filtering* yang menghasilkan korelasi kuat antara data satelit dan data *in situ*, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai r dan R<sup>2</sup> yang konsisten rendah di semua musim dan semua skenario *filtering*. Meskipun nilai RMSE dan MAE relatif moderat, tingginya MAPE (berkisar dari 77% hingga lebih dari 180%) menunjukkan adanya kesalahan relatif yang besar. Di antara tiga skenario *filtering*, *filtering* dengan *cloud fraction* < 0,05 sedikit lebih baik dibandingkan yang lain dengan nilai RMSE (0,65) dan MAPE (127,54%) yang lebih rendah secara keseluruhan. Namun, lemahnya hubungan statistik ini menunjukkan bahwa estimasi SO<sub>2</sub> dari satelit masih kurang dapat diandalkan dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung di lapangan pada penelitian ini.

Analisis statistik secara keseluruhan terhadap tiga parameter polutan di atas menunjukkan adanya variasi tingkat keandalan antara pengukuran satelit dan *in situ* pada berbagai skenario *filtering*. CO menunjukkan korelasi terkuat, khususnya pada kondisi dengan batas musiman, yang menandakan reliabilitas data satelit cukup baik. Begitu pula dengan NO<sub>2</sub> yang memperlihatkan kinerja baik, dengan metode *filtering* batas musiman memberikan hasil yang paling baik diantara lainnya.

Sebaliknya, SO<sub>2</sub> menunjukkan korelasi yang sangat lemah di semua kondisi, dengan MAPE yang tinggi dan nilai R<sup>2</sup> mendekati nol, sehingga mengindikasikan kesesuaian yang buruk serta keterbatasan dalam pemanfaatan estimasi SO<sub>2</sub> berbasis satelit untuk penilaian kualitas udara di permukaan.

#### 4.1.2 Gas Rumah Kaca

Analisis statistik terhadap CH<sub>4</sub> dan O<sub>3</sub> menerapkan skenario yang sama dengan polutan sebelumnya. Kinerja statistik dari masing-masing parameter dapat dijabarkan sebagai berikut:

Tabel 4.4 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi CH<sub>4</sub>

|                                | Musim | n  | r              | R <sup>2</sup> | RMSE  | MAE   | Bias     | MAPE | REGRESI             |
|--------------------------------|-------|----|----------------|----------------|-------|-------|----------|------|---------------------|
| Cloud Fraction < 0,05          | DJF   | 0  | Tidak Ada Data |                |       |       |          |      |                     |
|                                | MAM   | 0  | Tidak Ada Data |                |       |       |          |      |                     |
|                                | JJA   | 13 | 0,65           | 0,43           | 41,03 | 35,58 | 3E-13    | 1,79 | y = -977,30 + 1,59x |
|                                | SON   | 5  | 0,80           | 0,63           | 12,14 | 10,32 | -5E-14   | 0,52 | y = 214,49 + 0,93x  |
|                                | All   | 19 | 0,51           | 0,26           | 40,90 | 33,18 | 1,8E-13  | 1,66 | y = 74,03 + 1,02x   |
| Cloud Fraction < 0,1           | DJF   | 0  | Tidak Ada Data |                |       |       |          |      |                     |
|                                | MAM   | 0  | Tidak Ada Data |                |       |       |          |      |                     |
|                                | JJA   | 14 | 0,65           | 0,42           | 39,59 | 33,51 | 3,25E-13 | 1,69 | y = -965,54 + 1,59x |
|                                | SON   | 5  | 0,80           | 0,63           | 12,14 | 10,32 | -4,5E-14 | 0,52 | y = 214,49 + 0,93x  |
|                                | All   | 20 | 0,50           | 0,25           | 40,05 | 32,48 | 3,3E-13  | 1,63 | y = 106,65 + 1,00x  |
| Filtering dengan Batas Musiman | DJF   | 0  | Tidak Ada Data |                |       |       |          |      |                     |
|                                | MAM   | 0  | Tidak Ada Data |                |       |       |          |      |                     |
|                                | JJA   | 13 | 0,65           | 0,43           | 41,03 | 35,58 | 2,97E-13 | 1,79 | y = -977,30 + 1,59x |
|                                | SON   | 5  | 0,80           | 0,63           | 12,14 | 10,32 | -4,5E-14 | 0,52 | y = 214,49 + 0,93x  |
|                                | All   | 19 | 0,50           | 0,25           | 40,05 | 32,48 | 3,3E-13  | 1,63 | y = 106,65 + 1,00x  |

Untuk CH<sub>4</sub> terdapat sedikit keterbatasan karena data yang digunakan hanya berjumlah 20 *record* data, bahkan tidak tersedia data untuk periode Desember hingga Mei di semua tahun. Hasil analisis statistik menunjukkan adanya hubungan yang cukup kuat antara data satelit dan *in situ*, terutama pada musim JJA dan SON. Pada JJA, nilai korelasi mencapai r = 0,65 dengan R<sup>2</sup> = 0,42–0,43, sementara pada SON nilai korelasi lebih tinggi lagi, yaitu r = 0,80 dengan R<sup>2</sup> = 0,63. Kedua musim ini juga ditandai dengan RMSE yang relatif rendah (misalnya SON RMSE = 12,14;

MAE = 10,32) serta MAPE sangat kecil (0,52%), menandakan kesalahan relatif yang minimal.

Untuk analisis terhadap pemakaian semua data (ALL), korelasi total berada pada kisaran  $r = 0,50$ – $0,51$  dengan  $R^2 = 0,25$ – $0,26$ . Nilai RMSE berada di sekitar 40,05–40,90 dengan MAE = 32–33, dan MAPE hanya 1,63–1,66%. Angka ini mengindikasikan bahwa data satelit CH<sub>4</sub> cukup dapat diandalkan untuk mewakili konsentrasi aktual, terutama setelah melalui proses *filtering*. Dari ketiga skenario, skenario *filtering* dengan *cloud fraction* < 0,05 adalah yang terbaik. Sehingga persamaan yang digunakan untuk melakukan koreksi adalah sebagai berikut:

$$y = 74,03 + 1,02 x \quad (16)$$

Di mana:

y : Data CH<sub>4</sub> terkoreksi (ppb)

x : Data CH<sub>4</sub> satelit awal (ppb)

Tabel 4.5 Validasi Musiman dan Tahunan serta Model Regresi O<sub>3</sub>

|                                | Musim | n  | r     | R <sup>2</sup> | RMSE  | MAE  | Bias    | MAPE   | REGRESI               |
|--------------------------------|-------|----|-------|----------------|-------|------|---------|--------|-----------------------|
| Cloud Fraction < 0,05          | DJF   | 5  | 0,64  | 0,41           | 3,01  | 2,44 | -4E-14  | 21,210 | $y = -200,34 + 0,76x$ |
|                                | MAM   | 2  | -1,00 | 1,00           | 0,00  | 0,00 | -9E-14  | 0,000  | $y = 596,18 + -2,03x$ |
|                                | JJA   | 11 | 0,16  | 0,03           | 5,73  | 4,79 | 4,7E-15 | 19,525 | $y = -26,55 + 0,20x$  |
|                                | SON   | 11 | 0,26  | 0,07           | 6,09  | 5,50 | -1E-14  | 15,928 | $y = -25,71 + 0,22x$  |
|                                | All   | 29 | 0,31  | 0,09           | 10,38 | 8,77 | -2E-14  | 46,962 | $y = -118,10 + 0,52x$ |
| Cloud Fraction < 0,1           | DJF   | 8  | 0,32  | 0,10           | 3,41  | 2,73 | -9E-15  | 25,364 | $y = -86,33 + 0,35x$  |
|                                | MAM   | 7  | 0,49  | 0,24           | 4,97  | 3,56 | -1E-14  | 21,718 | $y = -103,68 + 0,44x$ |
|                                | JJA   | 19 | 0,18  | 0,03           | 6,38  | 5,66 | 1,1E-14 | 23,687 | $y = -49,52 + 0,28x$  |
|                                | SON   | 15 | 0,33  | 0,11           | 5,43  | 4,46 | -4E-15  | 12,855 | $y = -29,59 + 0,24x$  |
|                                | All   | 49 | 0,29  | 0,08           | 10,42 | 9,03 | -1E-14  | 48,458 | $y = -94,79 + 0,43x$  |
| Filtering dengan Batas Musiman | DJF   | 17 | 0,36  | 0,13           | 5,54  | 4,53 | 1,6E-14 | 34,442 | $y = -144,18 + 0,57x$ |
|                                | MAM   | 7  | 0,49  | 0,24           | 4,97  | 3,56 | -1E-14  | 21,718 | $y = -103,68 + 0,44x$ |
|                                | JJA   | 11 | 0,16  | 0,03           | 5,73  | 4,79 | 4,7E-15 | 19,525 | $y = -26,55 + 0,20x$  |
|                                | SON   | 15 | 0,33  | 0,11           | 5,43  | 4,46 | -4E-15  | 12,855 | $y = -29,59 + 0,24x$  |
|                                | All   | 50 | 0,35  | 0,12           | 10,77 | 9,49 | -2E-14  | 51,765 | $y = -137,96 + 0,58x$ |

Di antara ketiga skenario penyaringan (*filtering*) yang diuji, metode *filtering* dengan Batas Musiman menunjukkan kinerja yang paling seimbang dan dapat diandalkan untuk validasi data O<sub>3</sub> di semua musim. Metode ini secara keseluruhan mencapai nilai korelasi (*r*) tertinggi sebesar 0,35 dan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) tertinggi sebesar 0,12, dengan nilai error RMSE dan MAPE yang masih sebanding dengan metode lainnya.

Sementara itu, metode *filtering* dengan *Cloud Fraction* < 0,05 memang memberikan hasil korelasi yang sangat baik pada musim DJF (*r* = 0,64), namun kinerjanya sangat tidak konsisten dan bahkan sangat rendah di musim lain seperti JJA (*r* = 0,16). Kinerja ekstrem pada musim MAM (*r* = -1,00) juga tidak dapat diandalkan karena hanya didasarkan pada dua titik data (*n*=2).

Oleh karena itu, pendekatan berbasis batas musiman direkomendasikan sebagai metode yang terbaik untuk koreksi data satelit. Model koreksi yang diusulkan berdasarkan pendekatan ini disajikan pada persamaan (13) berikut:

$$y = -137,96 + 0,58x \quad (17)$$

Di mana:

- y* : Data O<sub>3</sub> terkoreksi (ppb)
- x* : Data O<sub>3</sub> satelit awal (ppb)

## 4.2 Analisis Pola Spasial Polutan dan GRK dari Data Satelit

### 4.2.1 Polutan

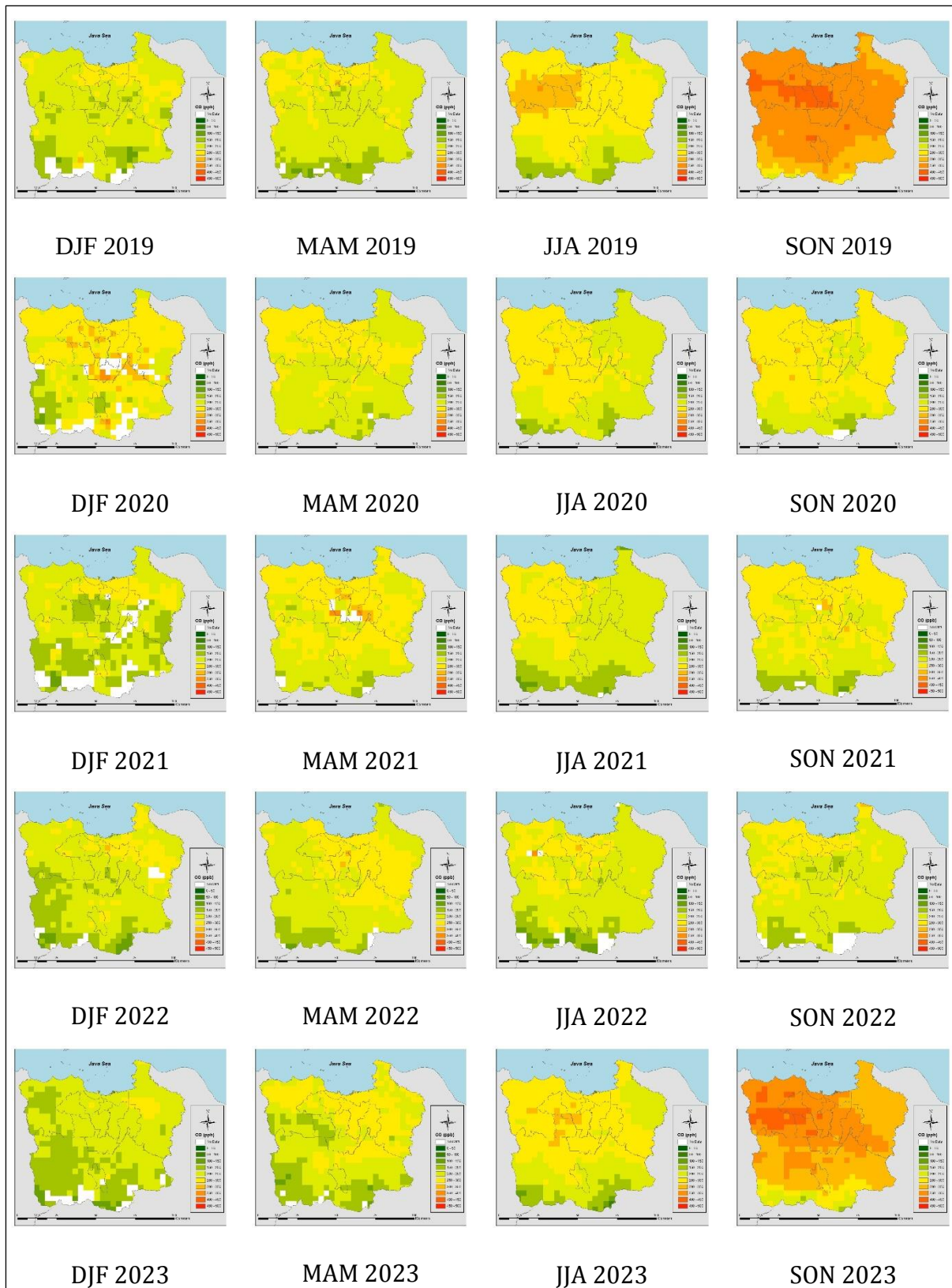
Pada subbab ini disajikan analisis distribusi spasial dan variabilitas musiman serta tahunan polutan atmosfer (CO, NO<sub>2</sub>, dan SO<sub>2</sub>) di wilayah studi berdasarkan data pengamatan satelit. Untuk CO dan NO<sub>2</sub>, visualisasi dihasilkan menggunakan data satelit yang telah dikoreksi dengan model regresi terbaik pada skenario batas musiman. Sebaliknya, untuk SO<sub>2</sub> digunakan data satelit tanpa koreksi, karena tidak ada model koreksi yang menunjukkan performa memadai. Namun keseluruhannya hanya menggunakan citra dengan *cloud fraction* < 0,1. Analisis mencakup komposit rata-rata musiman (DJF, MAM, JJA, SON) serta rata-rata tahunan untuk

periode 2019 hingga 2023. Selain itu, grafik garis temporal nilai rata-rata piksel juga disajikan untuk menggambarkan tren intra-musiman maupun antar-tahun. Grafik pertama menyajikan data dalam periode musiman selama 5 tahun dan grafik kedua menyajikan data dalam periode tahunan dalam 5 tahun.

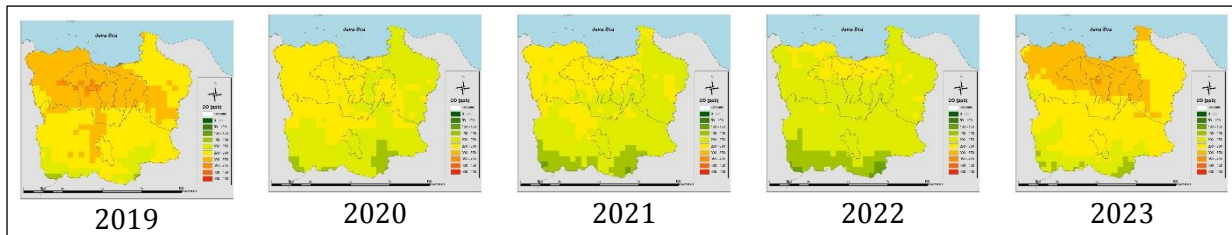
Grafik ini juga dapat digunakan untuk mengilustrasikan perbedaan nilai konsentrasi polutan yang diperoleh dari data satelit. Grafik tersebut mencakup empat kategori data:

1. Data Satelit Awal: Merupakan data mentah (asli) dari satelit yang belum melalui proses penyaringan tutupan awan (*cloud fraction filtering*) maupun koreksi regresi.
2. Data Satelit Terkoreksi (Tanpa Filter): Merupakan data satelit yang telah disesuaikan menggunakan model regresi linier, namun tanpa penerapan filter tutupan awan terlebih dahulu.
3. Data Satelit Terkoreksi (Dengan Filter): Merupakan data satelit yang telah melalui dua tahap proses, yaitu penyaringan tutupan awan (*cloud fraction filtering*) dan koreksi menggunakan model regresi.
4. Data Observasi *In situ* BMKG: Merupakan data hasil pengukuran langsung di lapangan (*in situ*) yang dirata-ratakan dan digunakan sebagai data pembandingan (referensi) untuk menggambarkan pola musiman dan tahunan.

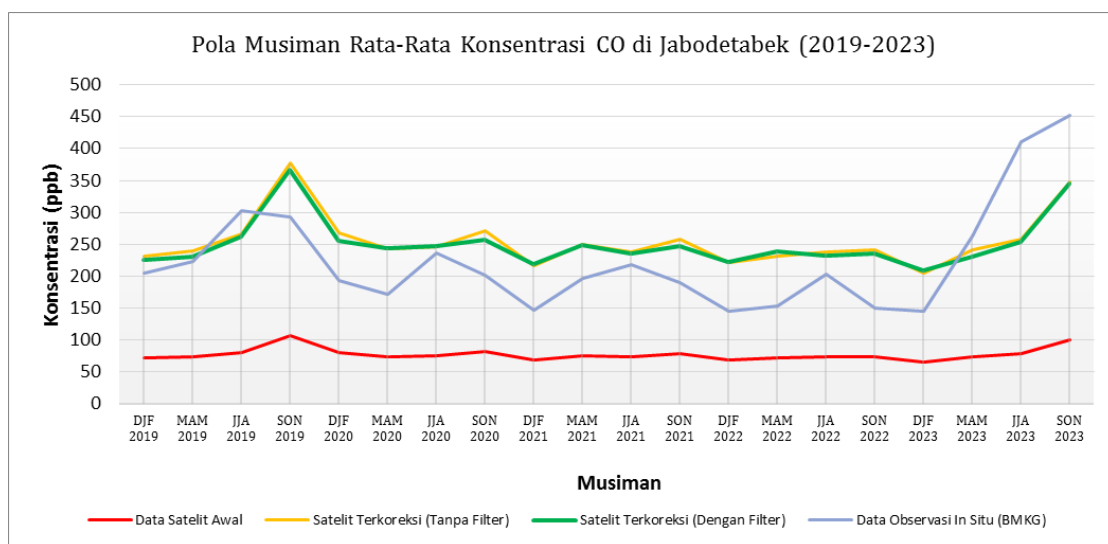
Data BMKG Cibeureum dipilih sebagai perbandingan *in situ* karena lokasi rural dinilai lebih merepresentasikan pola yang bersih dari pengaruh aktivitas antropogenik manusia. Perbandingan ini menunjukkan peran masing-masing tahapan pemrosesan dalam meningkatkan kualitas data dan kesesuaiannya dengan kondisi atmosfer nyata, khususnya untuk konsentrasi CO dan NO<sub>2</sub> di wilayah Jabodetabek



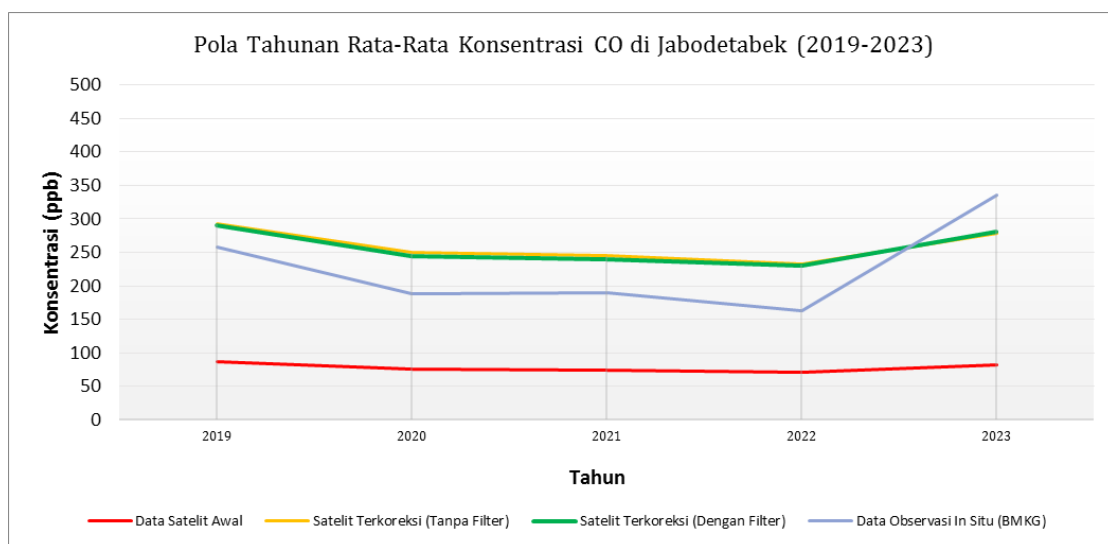
Gambar 4.1 Distribusi Spasial Konsentrasi CO di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023



Gambar 4.2 Distribusi Spasial Konsentrasi CO di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023



Gambar 4.3 Perbandingan antara Konsentrasi CO dari Data Satelit dan Data *In Situ* di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)



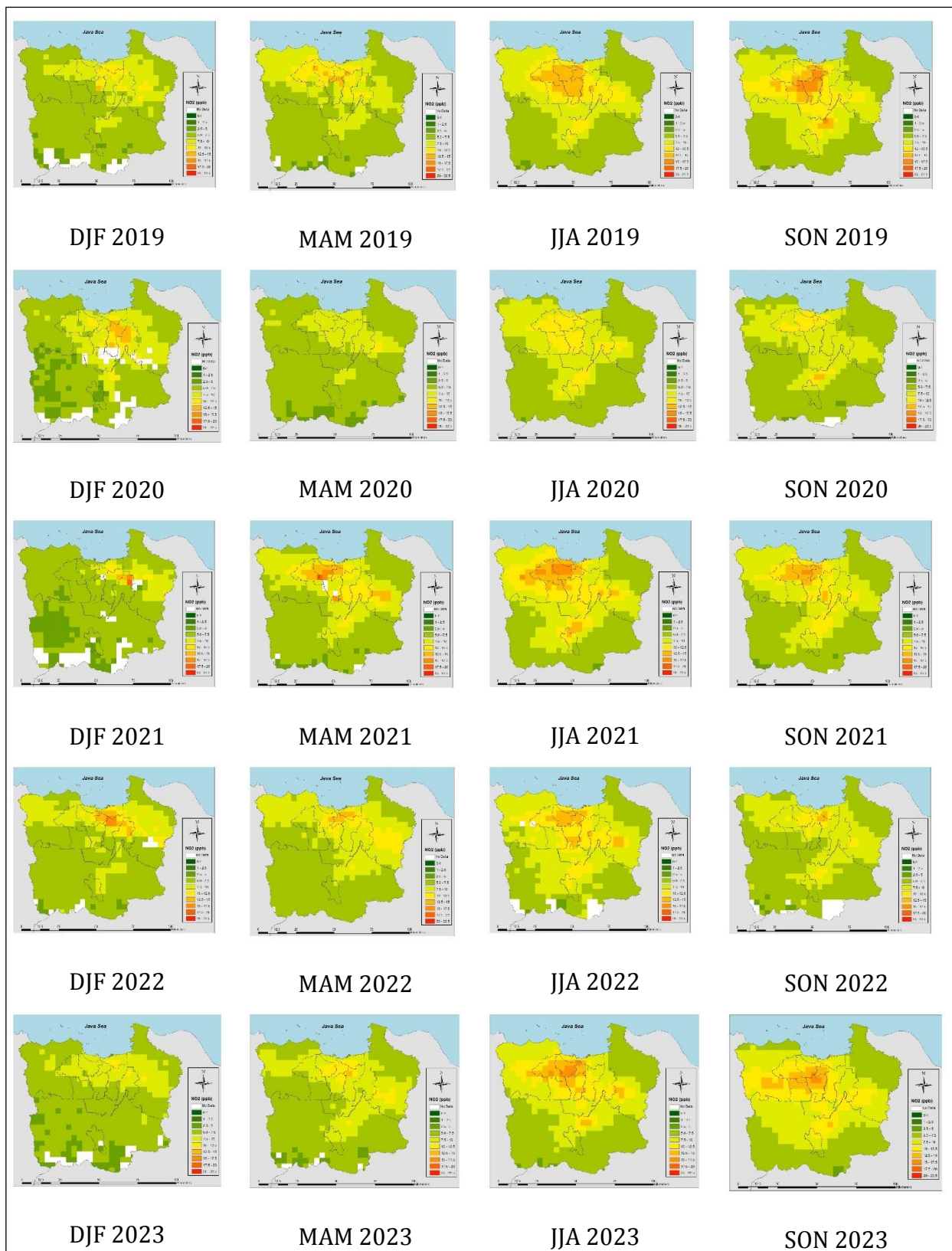
Gambar 4.4 Perbandingan antara Konsentrasi CO dari Data Satelit dan Data *In Situ* di Jabodetabek Tahunan (2019–2023)

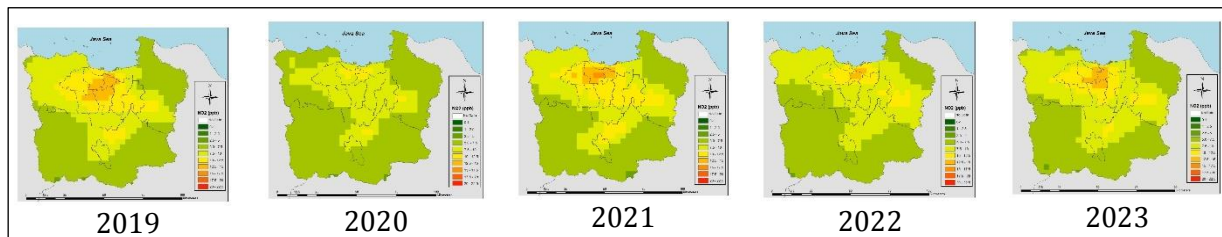


Hasil penelitian menunjukkan adanya pola spasial yang tidak konsisten, anatar wilayah urban dan rural. Untuk analisis musiman juga tidak cukup jelas, di mana konsentrasi CO cenderung mencapai puncaknya pada musim kemarau (JJA) dan menurun pada musim peralihan (MAM dan SON). Konsentrasi terendah umumnya teramati pada musim hujan (DJF). Secara spasial, peta distribusi memperlihatkan bahwa konsentrasi CO lebih tinggi di wilayah Utara Jabodetabek, yang mencakup kawasan perkotaan padat dan area industri. Sebaliknya, tingkat CO yang lebih rendah ditemukan di bagian Selatan, yang didominasi oleh kawasan pegunungan dan lahan pertanian (Gambar 4.1),

Peta distribusi tahunan CO menunjukkan bahwa tingkat pencemaran dan pola sebarannya sangat terkait dengan kondisi ENSO. Konsentrasi CO yang tinggi terlihat pada tahun-tahun El Nino, khususnya pada tahun 2019 (El Nino lemah) dan 2023 (El Nino lemah hingga moderat). Sebaliknya, konsentrasi yang lebih rendah teramati pada periode La Nina, yaitu tahun 2020 (La Nina lemah hingga moderat), 2021 (La Nina moderat), dan 2022 (La Nina lemah) (Gambar 4.2). Perbedaan tahunan terlihat jelas pada grafik perbandingan tahunan (Gambar 4.4). Temuan ini menegaskan adanya pengaruh variabilitas iklim terhadap dinamika polusi atmosfer di wilayah Jabodetabek yang tertangkap dengan jelas oleh Sentinel 5P.

Grafik perbandingan memperlihatkan adanya puncak musiman yang konsisten pada JJA (Gambar 4.3) serta peningkatan konsentrasi tahunan pada tahun-tahun El Nino (2019, 2023) (Gambar 4.4). Pola musiman ini sebelumnya tidak tampak jelas sebelum dilakukan koreksi regresi, Setelah penerapan koreksi regresi, pola tersebut menjadi lebih nyata dan nilai konsentrasinya lebih merepresentasikan kondisi sebenarnya.





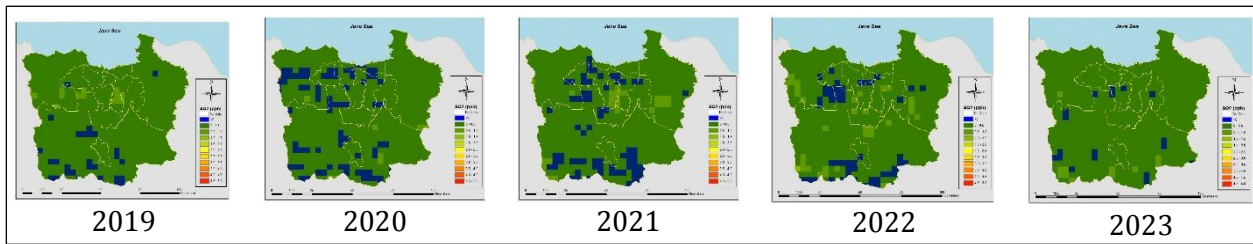
Distribusi spasial NO<sub>2</sub> juga secara jelas mencerminkan perbedaan antara wilayah perkotaan dan pedesaan. Konsentrasi lebih tinggi yang secara konsisten teramati di zona perkotaan, khususnya di bagian Utara dan tengah Jabodetabek. Sebaliknya, tingkat konsentrasi yang lebih rendah terlihat di bagian Selatan yang lebih bersifat rural. Secara musiman, konsentrasi NO<sub>2</sub> cenderung meningkat pada musim kemarau (JJA), sementara nilai yang lebih rendah muncul pada musim peralihan (MAM dan SON). Konsentrasi terendah umumnya terjadi pada musim hujan (DJF), sejalan dengan pola dispersi atmosfer dan proses *washout* (pencucian polutan oleh hujan) yang diharapkan selama periode curah hujan tinggi (Gambar 4.5).

Secara tahunan, pola distribusi juga tampak selaras dengan fase ENSO, di mana tingkat NO<sub>2</sub> meningkat pada tahun-tahun El Nino (misalnya 2019 dan 2023) serta menurun pada periode La Nina (2020 dan 2022). Namun, terdapat puncak anomali pada tahun 2021, yang dikategorikan sebagai periode La Nina moderat, di mana konsentrasi NO<sub>2</sub> justru lebih tinggi dari perkiraan. Anomali ini menunjukkan perlunya investigasi lebih lanjut terhadap faktor-faktor penyebab pada tahun tersebut seperti kejadian emisi lokal karena peningkatan aktifitas manusia, kondisi atmosfer tertentu atau potensi lainnya terkait masalah kualitas data (Gambar 4.6).

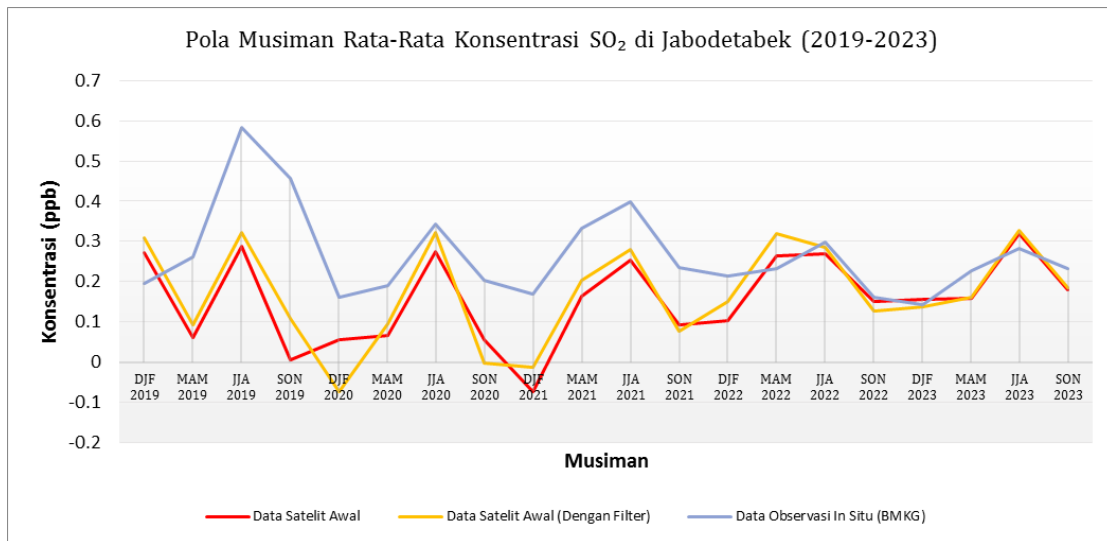
Dataset hasil *filtering* serta koreksi regresi memainkan peran penting dalam menyesuaikan konsentrasi CO dan NO<sub>2</sub> yang diperoleh dari satelit mentah. Penerapan model regresi linier secara signifikan meningkatkan kesesuaian antara data satelit dan pengamatan berbasis darat sehingga menghasilkan nilai yang lebih merefleksikan kondisi atmosfer nyata di wilayah Jabodetabek (Gambar 4.3 dan Gambar 4.7).



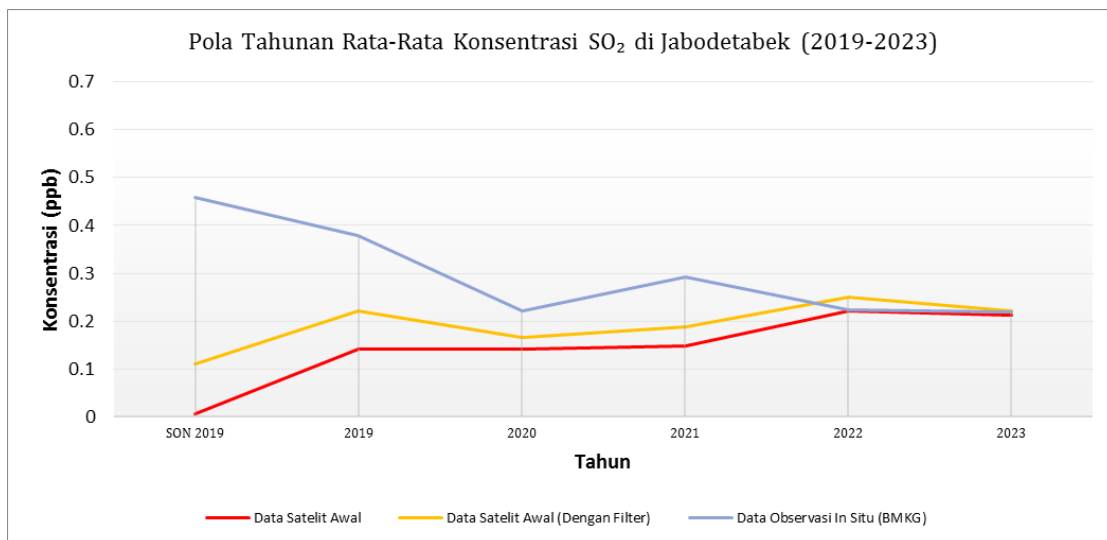




Gambar 4.10 Distribusi Spasial Konsentrasi SO<sub>2</sub> di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023



Gambar 4.11 Perbandingan antara Konsentrasi SO<sub>2</sub> dari Data Satelit dan Data *In Situ* di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)



Gambar 4.12 Perbandingan antara Konsentrasi SO<sub>2</sub> dari Data Satelit dan Data *In Situ* di Jabodetabek Tahunan (2019–2023)

Berbeda dengan CO dan NO<sub>2</sub>, data SO<sub>2</sub> berbasis satelit tidak dikoreksi menggunakan model regresi karena menunjukkan korelasi yang sangat lemah dengan pengukuran *in situ*, sebagaimana dijelaskan pada bagian analisis statistik sebelumnya. Oleh karena itu, analisis spasial dan musiman dilakukan menggunakan nilai satelit mentah baik dengan maupun tanpa *filtering cloud fraction*.

Hasil analisis musiman menunjukkan bahwa konsentrasi SO<sub>2</sub> masih dipengaruhi oleh variasi musim dan fase ENSO, meskipun terdapat beberapa anomali, misalnya pada DJF 2019. Secara umum, pola musiman SO<sub>2</sub> menunjukkan kemiripan yang cukup baik dengan data *in situ*. Walaupun hasil validasi statistik menunjukkan nilai korelasi (*r*) yang rendah, indikasi spasial-temporal SO<sub>2</sub> dari data satelit masih dapat memberikan gambaran yang cukup representatif. Dan karena tidak dilakukan koreksi regresi, banyak ditemukan nilai negatif, bahkan pada beberapa musim nilai rata-ratanya berada di bawah nol. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, konsentrasi SO<sub>2</sub> sangat reaktif dan berumur pendek di atmosfer, sering kali berubah secara drastis hanya dalam hitungan jam atau hari. Kedua, konsentrasi SO<sub>2</sub> sangat dipengaruhi oleh sumber emisi sporadis seperti aktivitas industri atau letusan gunung berapi, serta kondisi meteorologi lokal termasuk arah angin, curah hujan, dan stabilitas atmosfer. Selain itu, dalam kondisi normal tanpa kejadian emisi besar, kadar SO<sub>2</sub> di atmosfer umumnya sangat rendah, bahkan sering mendekati batas deteksi instrumen satelit.

Karakteristik tersebut menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut agar hasil validasi antara data satelit dan *in situ* dapat ditingkatkan. Meskipun demikian, SO<sub>2</sub> masih dinilai cukup representatif untuk dijadikan alternatif yang efisien dalam pemantauan kualitas udara sebagai pelengkap pengamatan berbasis darat,

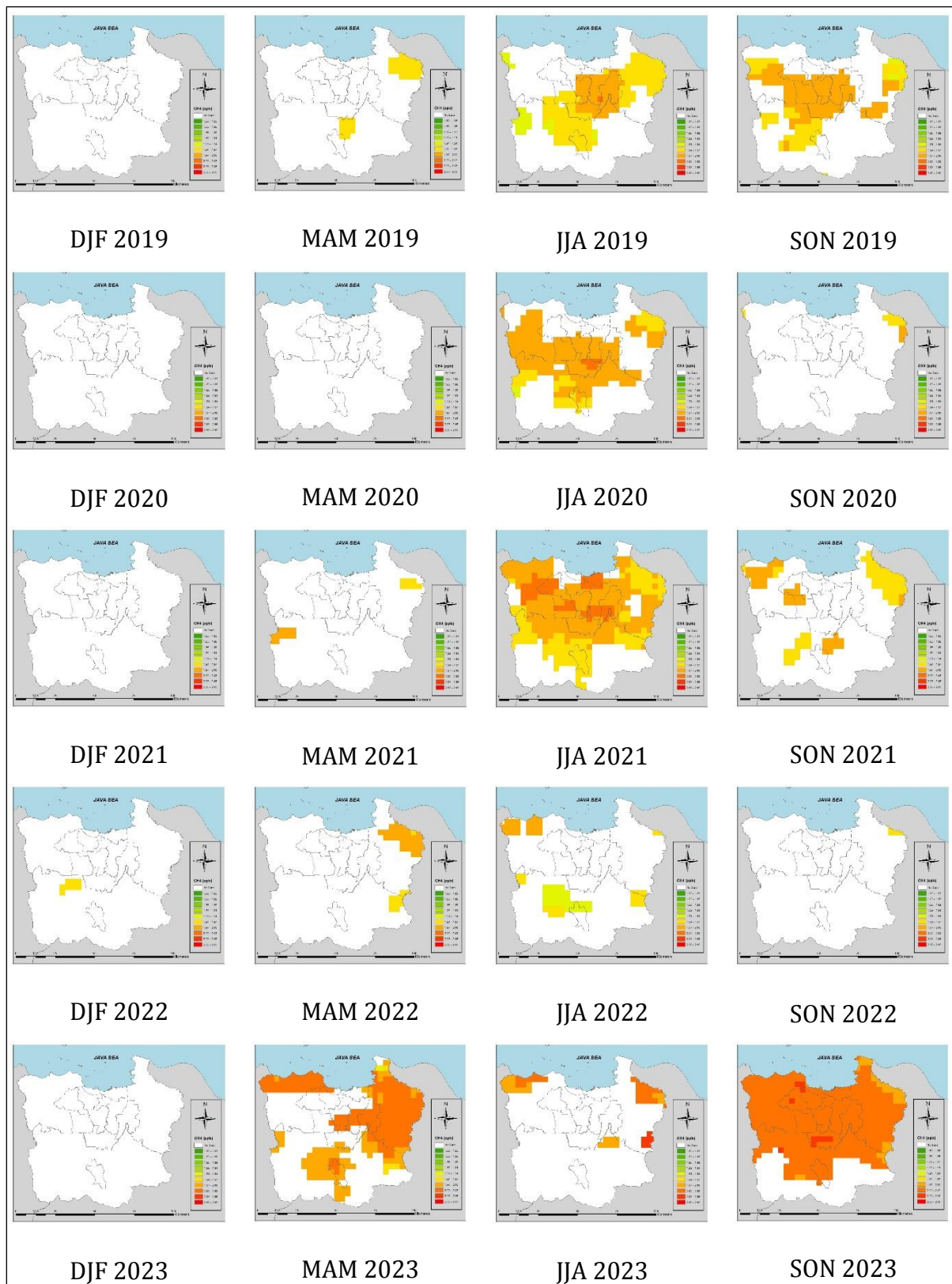
#### **4.2.2 Gas Rumah Kaca**

Pada subbab ini disajikan analisis distribusi spasial dan variabilitas musiman gas rumah kaca (GRK), yaitu metana (CH<sub>4</sub>) dan ozon (O<sub>3</sub>), di wilayah studi yang sama. Analisis ini krusial untuk memahami kontribusi wilayah urban seperti Jabodetabek terhadap konsentrasi GRK dan bagaimana pola meteorologi musiman memengaruhinya.

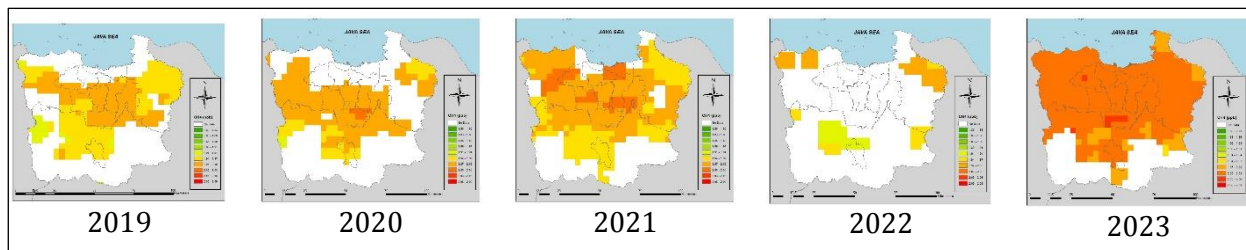
Secara sistematis, pembahasan akan diawali dengan analisis spasial dan temporal untuk CH<sub>4</sub>, yang kemudian diikuti oleh analisis serupa untuk O<sub>3</sub>. Untuk CH<sub>4</sub>, visualisasi dihasilkan menggunakan data satelit yang telah melalui proses *filtering* dengan *cloud fraction* < 0,1 serta dikoreksi dengan model regresi terbaik pada skenario *cloud fraction* < 0,05. Sedangkan untuk O<sub>3</sub> menggunakan data satelit yang telah melalui proses *filtering* dengan *cloud fraction* < 0,1 serta dikoreksi dengan model regresi terbaik pada skenario batas musiman. Analisis mencakup komposit rata-rata musiman (DJF, MAM, JJA, SON) serta rata-rata tahunan untuk periode 2019 hingga 2023. Grafik garis temporal nilai rata-rata piksel juga disajikan untuk menggambarkan tren musiman maupun tahunan, untuk mengilustrasikan perbedaan nilai konsentrasi GRK yang diperoleh dari data satelit serta data *in situ*.

Penyajian data untuk gas rumah kaca (GRK) menggunakan jenis grafik yang sama seperti pada pembahasan polutan sebelumnya.

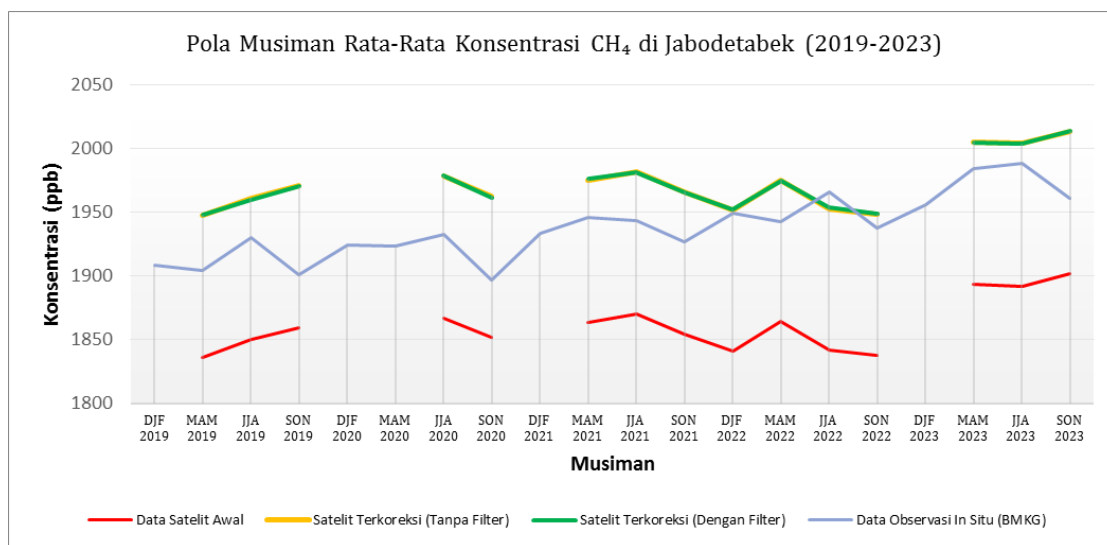




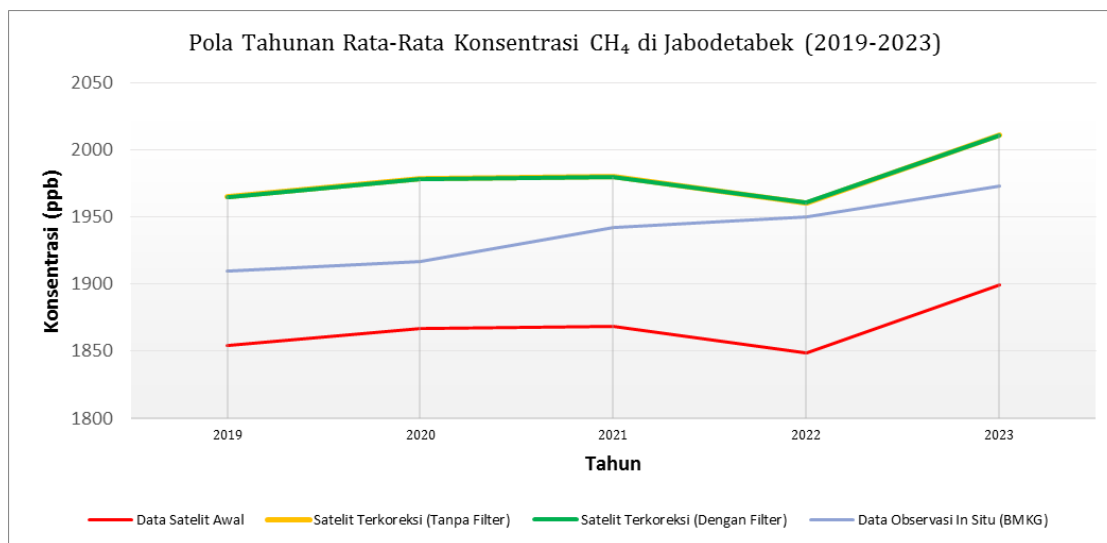
Gambar 4.13 Distribusi Spasial Konsentrasi  $\text{CH}_4$  di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023



Gambar 4.14 Distribusi Spasial Konsentrasi CH<sub>4</sub> di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023



Gambar 4.15 Perbandingan antara Konsentrasi CH<sub>4</sub> dari Data Satelit Terkoreksi dan Data *In Situ* di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)

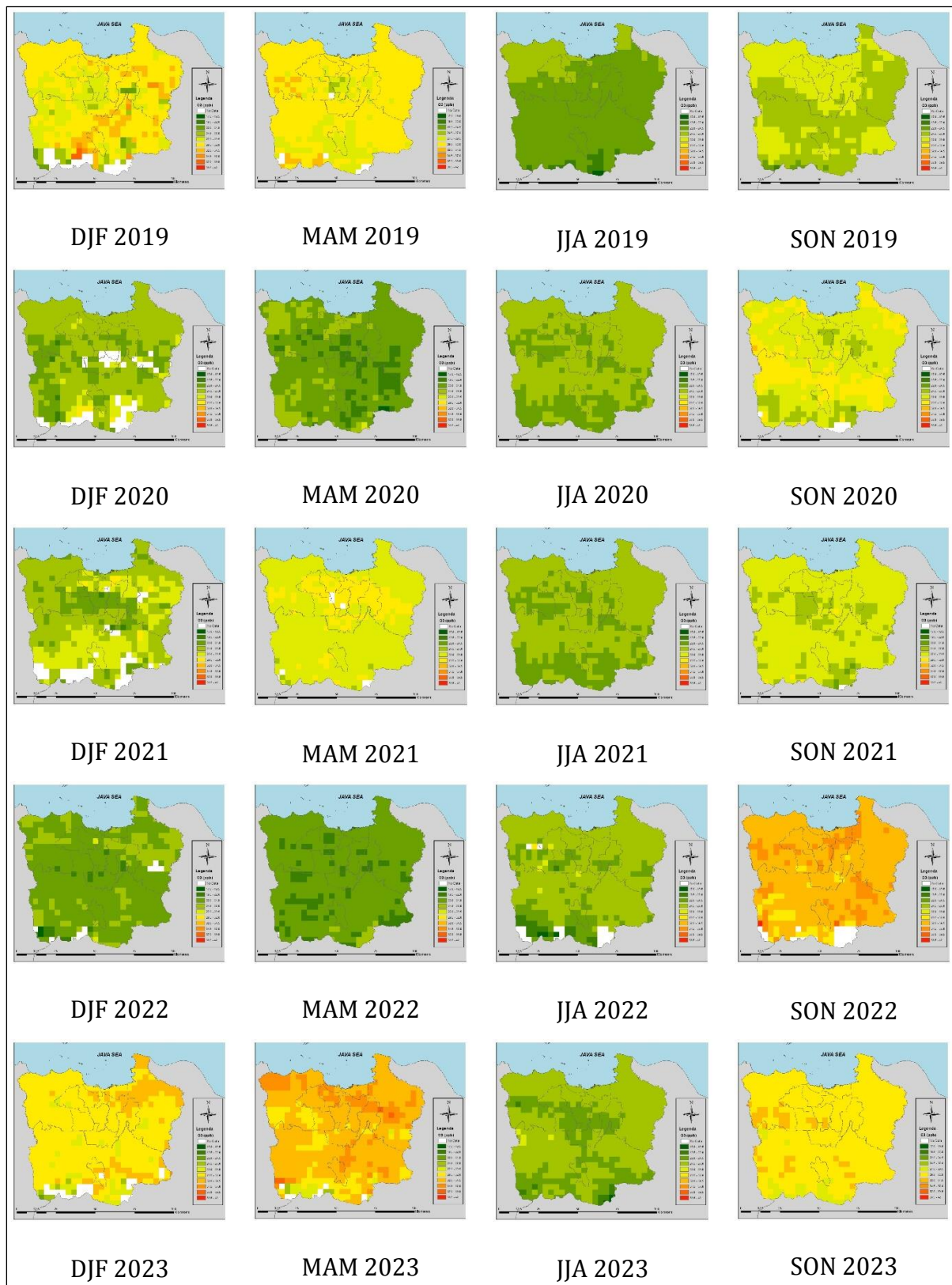


Gambar 4.16 Perbandingan antara Konsentrasi CH<sub>4</sub> dari Data Satelit Terkoreksi dan Data *In Situ* di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)

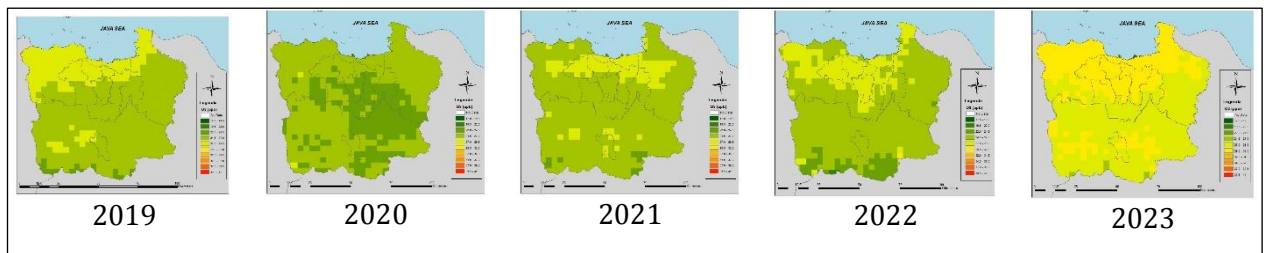
Distribusi spasial metana ( $\text{CH}_4$ ) di wilayah Jabodetabek menunjukkan adanya variasi yang signifikan, baik secara musiman maupun tahunan. Namun, analisis musiman menjadi cukup sulit karena banyaknya piksel data yang hilang atau kosong pada citra satelit Sentinel-5P. Keterbatasan ini menunjukkan bahwa data  $\text{CH}_4$  dari Sentinel-5P kurang andal (reliable) untuk analisis temporal beresolusi tinggi di wilayah tropis seperti Jabodetabek, terutama pada bulan-bulan dengan tutupan awan tinggi selama musim hujan. Hal ini menjadi tantangan tersendiri, mengingat seharusnya nilai konsentrasi  $\text{CH}_4$  di wilayah Jabodetabek terdeteksi cukup besar, apalagi  $\text{CH}_4$  mempunyai masa hidup yang cukup lama yang memungkinkannya terakumulasi di atmosfer.

Meskipun demikian, dari data yang tersedia, tren musiman secara umum menunjukkan bahwa konsentrasi  $\text{CH}_4$  cenderung lebih tinggi pada musim kemarau (JJA) dibandingkan dengan musim hujan (DJF). Selain itu, teramati adanya kenaikan konsentrasi yang konsisten dari DJF 2019 hingga SON 2023 (Gambar 4.14). Tren kenaikan ini juga didukung oleh sifat  $\text{CH}_4$  yang memiliki masa hidup panjang di atmosfer (sekitar 7-9 tahun), sehingga emisi  $\text{CH}_4$  terus terakumulasi dari waktu ke waktu.

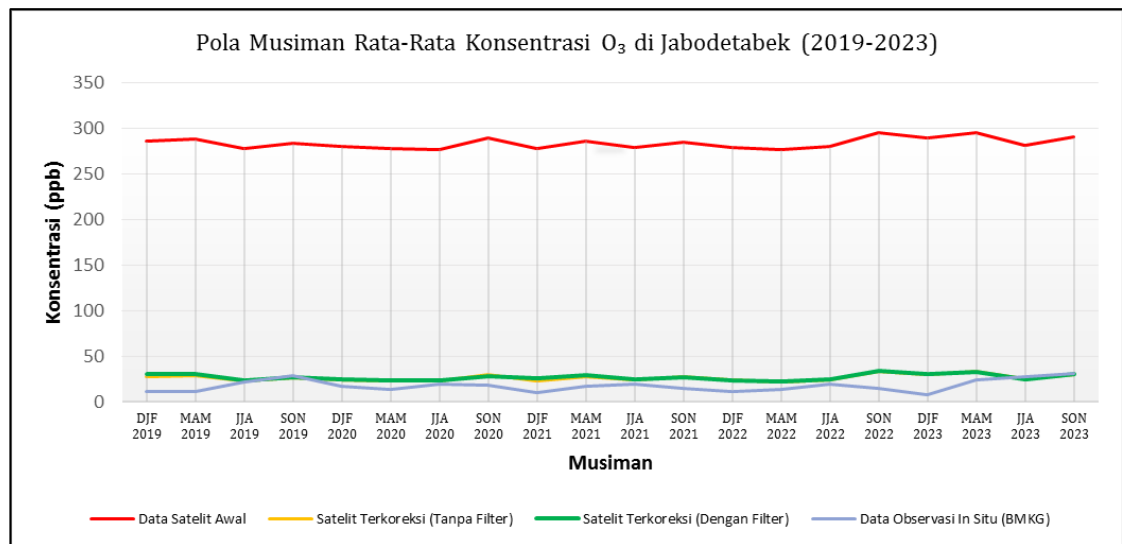
Grafik rata-rata tahunan (Gambar 4.16) menunjukkan adanya tren peningkatan konsentrasi  $\text{CH}_4$  dari tahun 2019 hingga 2023, walau ada anomali di tahun 2022, puncak konsentrasi tertinggi terjadi secara signifikan pada tahun 2023, yang bertepatan dengan periode El Nino moderat.



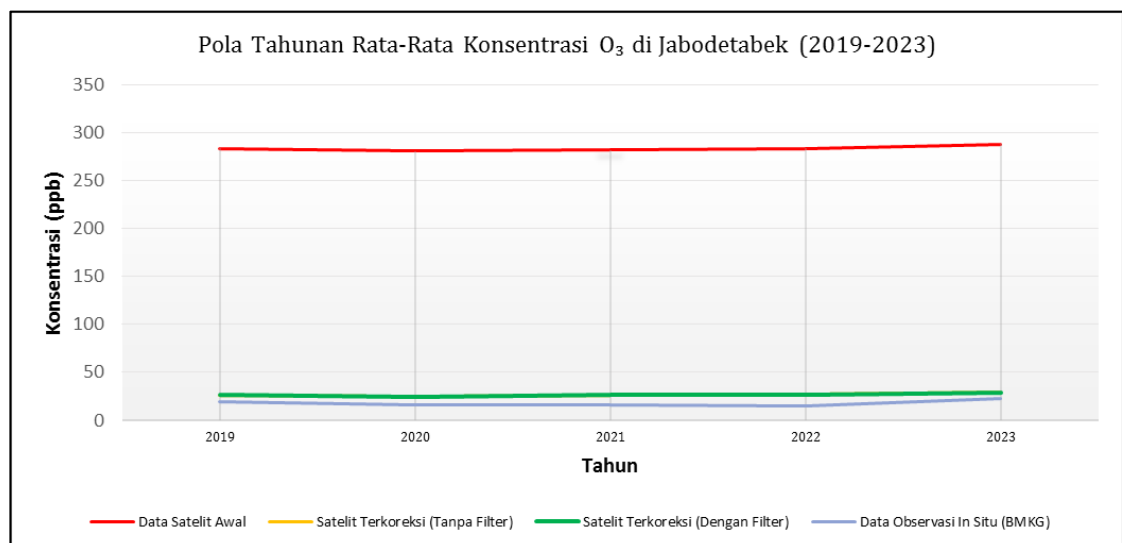
Gambar 4.17 Distribusi Spasial Konsentrasi O<sub>3</sub> di Wilayah Jabodetabek Berdasarkan Musim Periode 2019–2023



Gambar 4.18 Distribusi Spasial Konsentrasi O<sub>3</sub> di Wilayah Jabodetabek Tahunan Periode 2019–2023



Gambar 4.19 Perbandingan antara Konsentrasi O<sub>3</sub> dari Data Satelit Terkoreksi dan Data *In Situ* di Jabodetabek Secara Musiman (2019–2023)



Gambar 4.20 Perbandingan antara Konsentrasi O<sub>3</sub> dari Data Satelit Terkoreksi dan Data *In Situ* di Jabodetabek Tahunan (2019–2023)

Analisis untuk ozon permukaan ( $O_3$ ) dari data satelit di wilayah Jabodetabek menunjukkan beberapa kelemahan dalam menjelaskan pola yang sebenarnya terjadi di permukaan. Salah satu masalah utama adalah distribusi spasial yang tidak konsisten, di mana data satelit sering kali menunjukkan konsentrasi yang lebih tinggi di wilayah rural (Selatan Jabodetabek) dibandingkan dengan area urban (Utara), bertentangan dengan pola emisi prekursor yang seharusnya terjadi (Gambar 4.17). Begitu pula pola tahunan yang terbentuk tidak terlalu jelas antara tahun El Nino dan tahun La Nina, meskipun terlihat pada tahun 2023 konsentrasi  $O_3$  terlihat lebih tinggi dibanding tahun lainnya (Gambar 4.18).

Perbedaan ini diperparah oleh perbedaan skala nilai yang dihasilkan oleh satelit, data satelit mengukur konsentrasi dalam ratusan ppb, sementara data *in situ* hanya dalam puluhan ppb. Hal ini disebabkan karena satelit Sentinel 5P ini pada dasarnya mengukur total ozon di seluruh kolom atmosfer yang dimana konsentrasi  $O_3$  didominasi berdiam di lapisan stratosfer, bukan ozon permukaan seperti yang diukur oleh stasiun di darat.

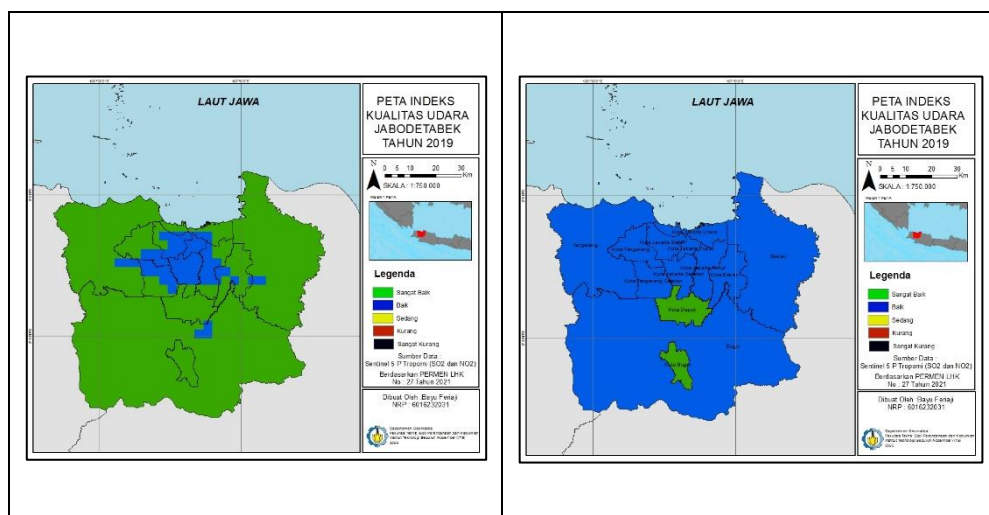
Akibatnya, meskipun proses koreksi dengan model regresi terbaik telah diterapkan, hasilnya tetap tidak memadai. Korelasi yang dihasilkan hasil analisis statistik sebelumnya sangat lemah ( $r = 0,35$ ), dan data satelit gagal mereplikasi pola musiman yang logis, bahkan sering kali menunjukkan pola yang bertolak belakang dengan pengamatan *in situ*, seperti menunjukkan nilai  $O_3$  yang lebih tinggi di musim hujan padahal seharusnya konsentrasi puncak terjadi di musim kemarau (Gambar 4.19). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa estimasi  $O_3$  dari data satelit yang digunakan dalam penelitian ini tidak cukup akurat untuk menggambarkan kondisi di permukaan dan memerlukan metode validasi yang lebih canggih.

#### **4.3 Analisis Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek**

Pada subbab ini, dilakukan analisis terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU) di wilayah Jabodetabek. IKU dihitung berdasarkan hasil analisis polutan yang diperoleh dari data pengamatan satelit Sentinel-5P, dengan parameter yang digunakan yaitu  $NO_2$  dan  $SO_2$ . Perhitungan IKU ini mengikuti pedoman yang tercantum dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik



Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (PERMEN LHK No, 27 Tahun 2021). Berikut ini disajikan peta tematik IKU tahunan. Peta sebelah kiri menunjukkan data sebaran IKU dalam format grid. Peta kanan kemudian menetapkan nilai untuk setiap kabupaten/kota dengan mengambil data kondisi kualitas udara yang paling buruk dari area / wilayah administrasi daerah tersebut.

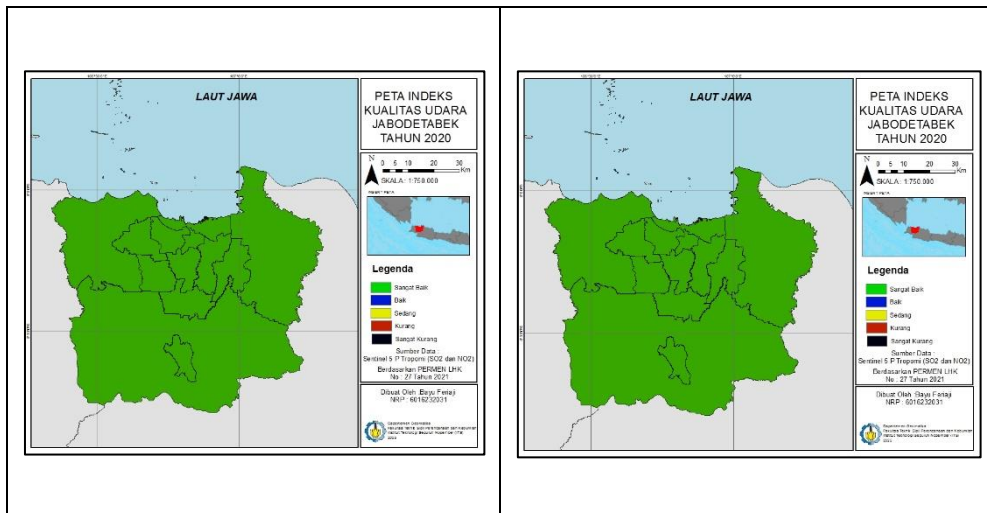


Gambar 4.21 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2019

Berdasarkan data Indeks Kualitas Udara (IKU) tahun 2019, kualitas udara di kawasan Jabodetabek secara umum berada pada kategori Baik hingga Sangat Baik. Peta sebaran spasial (kiri) menunjukkan dominasi warna hijau, yang merepresentasikan kualitas udara Sangat Baik di sebagian besar wilayah. Meskipun demikian, konsentrasi kualitas udara yang sedikit lebih rendah terdeteksi di beberapa pusat aktivitas perkotaan seperti Jakarta Pusat, Jakarta Utara, Jakarta Timur, Jakarta Selatan, dan Jakarta Barat, yang masuk dalam kategori Baik (berwarna biru).

Setelah data tersebut diagregasi berdasarkan batas administrasi (peta kanan) terlihat gambaran yang lebih seragam. Hasilnya menunjukkan bahwa hanya Kota Bogor dan Kota Depok yang masuk dalam kategori Sangat Baik. Sebaliknya, seluruh wilayah administrasi lainnya di Jabodetabek terkategori Baik,

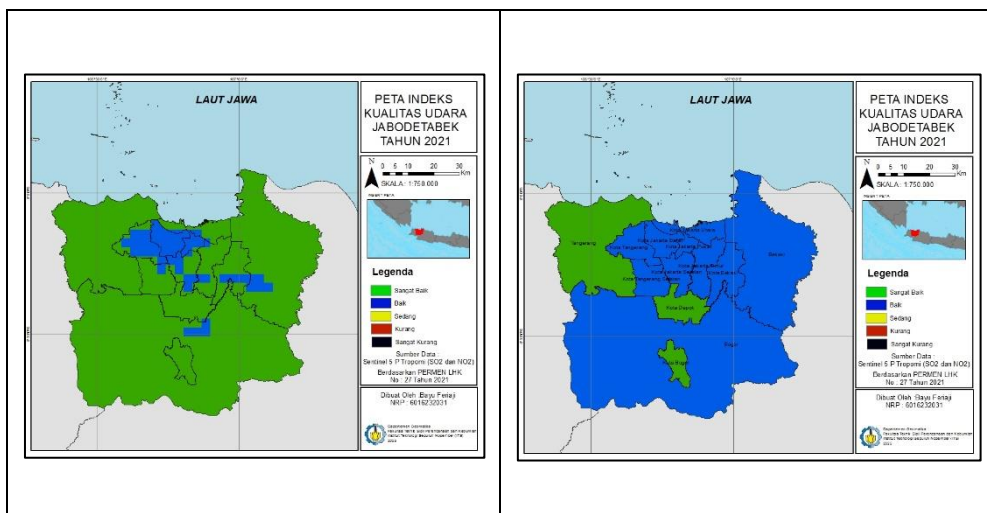
Implikasinya, jika data ini ditarik ke level provinsi, maka IKU untuk wilayah DKI Jakarta, Banten, dan Jawa Barat yang termasuk dalam lingkup Jabodetabek pada tahun 2019 ini seluruhnya akan dilaporkan dalam kategori Baik,



Gambar 4.22 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2020

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa pada tahun 2020 hampir seluruh wilayah Jabodetabek berada dalam kategori Sangat Baik (hijau), Kondisi ini tidak hanya dipengaruhi oleh fenomena La Nina yang meningkatkan curah hujan, tetapi juga erat kaitannya dengan menurunnya aktivitas transportasi dan industri selama masa pandemi COVID-19. Pembatasan mobilitas dan lockdown menyebabkan emisi polutan berkurang signifikan, sehingga kualitas udara pada tahun 2020 tampak lebih merata dan relatif lebih bersih dibandingkan tahun-tahun lainnya.

Dengan demikian, kesimpulan yang dapat ditarik untuk Indeks Kualitas Udara (IKU) di tingkat provinsi pada tahun 2020 adalah bahwa wilayah Jawa Barat, DKI Jakarta, dan Banten yang termasuk dalam cakupan Jabodetabek seluruhnya memiliki IKU dalam kategori Sangat Baik.

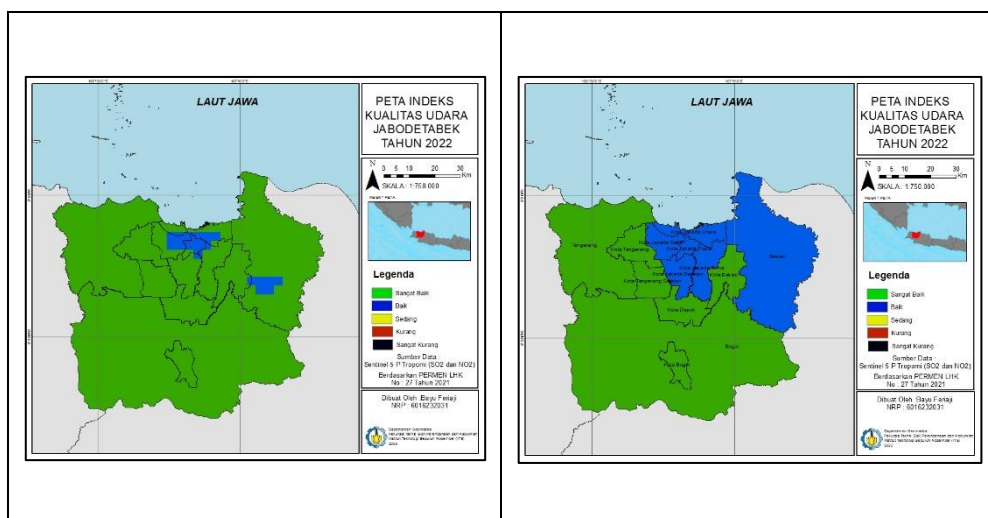


Gambar 4.23 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2021



Gambar 4.23 menunjukkan bahwa pada tahun 2021 kualitas udara di Jabodetabek sebagian besar masih berada pada kategori Baik dan Sangat Baik. Beberapa wilayah perkotaan di bagian tengah dan utara tercatat masuk kategori Sangat Baik, sementara area lain relatif stabil dalam kategori Baik. Dibandingkan tahun 2020, terlihat adanya sedikit peningkatan polusi di beberapa wilayah, kemungkinan terkait dengan mulai pulihnya aktivitas ekonomi dan transportasi setelah masa pembatasan ketat pandemi COVID-19 pada tahun sebelumnya.

Kabupaten Tangerang, Kota Depok, dan Kota Bogor masuk dalam kategori Sangat Baik, sementara kabupaten/kota lainnya berada dalam kategori Baik. Namun, jika dilihat dari keseluruhan IKU provinsi untuk tahun 2021, ketiga provinsi tersebut (Jawa Barat, DKI Jakarta, dan Banten) masuk dalam kategori Baik.

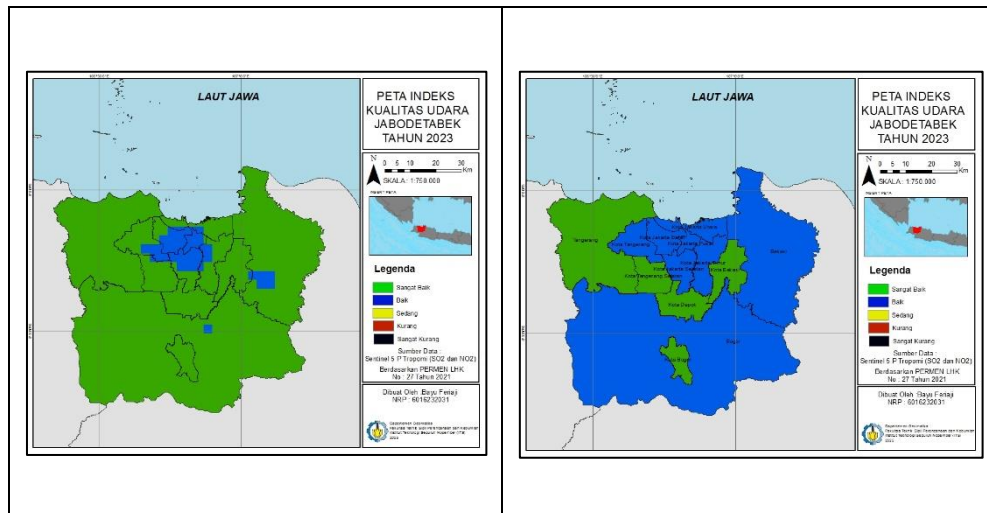


Gambar 4.24 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2022

Gambar 4.24 menunjukkan bahwa pada tahun 2022, kualitas udara di Jabodetabek secara umum berada dalam kategori Sangat Baik dan Baik. Sebagian besar wilayah Selatan dan Barat menunjukkan kategori Sangat Baik, sementara wilayah Utara dan Timur lebih dominan dalam kategori Baik. Seluruh kota di Provinsi DKI Jakarta dan Kabupaten Bekasi berada dalam kondisi Baik, sedangkan kabupaten dan kota lainnya berada dalam kondisi Sangat Baik.

Jika ditarik kesimpulan berdasarkan IKU provinsi, Provinsi Jakarta dan Provinsi Jawa Barat termasuk dalam kategori Baik, sementara Provinsi Banten,

yang diwakili oleh Kota Tangerang Selatan, Kota Tangerang, dan Kabupaten Tangerang, masuk dalam kategori Sangat Baik.



Gambar 4.25 Indeks Kualitas Udara Tahunan Jabodetabek Tahun 2023

Gambar 4.25 menunjukkan bahwa pada tahun 2023, kualitas udara di Jabodetabek secara umum berada dalam kategori Baik dan Sangat Baik. Sebagian besar wilayah Utara, Timur, dan Selatan didominasi oleh kategori Baik, sementara beberapa bagian Barat masih berada dalam kategori Sangat Baik. Seluruh kota di Provinsi DKI Jakarta, Kota Tangerang, Kabupaten Bekasi, dan Kabupaten Bogor berada dalam kondisi Baik, sedangkan wilayah lainnya berada dalam kondisi Sangat Baik.

Jika ditarik kesimpulan berdasarkan IKU provinsi tahun 2023, ketiga provinsi tersebut (DKI Jakarta, Jawa Barat, dan Banten) masing-masing berada dalam kategori Baik.

Berikut adalah tabel perbandingan IKU yang dihitung dari data satelit Sentinel-5P dan data dari laporan tahunan Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan (Ditjen PPKL). Pada tabel ini, hanya Provinsi DKI Jakarta yang ditampilkan karena hasil pembentukan IKU dari data satelit secara penuh hanya tersedia untuk provinsi tersebut, sementara dua provinsi lainnya belum lengkap, hanya terwakili oleh beberapa kota / kabupaten saja. Perbedaan kategori IKU antara kedua sumber data sangat relevan dengan perbedaan metode pengambilan sampel. Laporan Ditjen PPKL umumnya didasarkan pada sampel lokal dari titik pemantauan tertentu, sementara satelit menghasilkan data

dengan cakupan spasial yang lebih luas sehingga dapat menangkap variasi kondisi udara secara regional.

Tabel 4.6 Tabel Perbandingan IKU Satelit dengan Laporan Ditjen PPKL

|       |      | IKU berdasarkan Sentinel 5P | IKU berdasarkan Laporan Ditjen PPKL |
|-------|------|-----------------------------|-------------------------------------|
| TAHUN | 2019 | 85,0 (BAIK)                 | Tidak Ada Data                      |
|       | 2020 | 91,4 (SANGAT BAIK)          | 66,7 (SEDANG)                       |
|       | 2021 | 85,0 (BAIK)                 | 66,5 (SEDANG)                       |
|       | 2022 | 88,3 (BAIK)                 | Tidak Ada Data                      |
|       | 2023 | 86,6 (BAIK)                 | 68,5 (SEDANG)                       |

Bagi penulis, penetapan IKU menggunakan data satelit dalam penelitian ini dinilai lebih representatif dan pas. Alasannya, kualitas udara merupakan fenomena spasial yang tidak dapat digambarkan secara akurat hanya dengan mengambil sampel dari beberapa titik pemantauan darat dalam periode waktu yang singkat yang dinilai tidak dapat mewakili satu wilayah yang luas. Data satelit menawarkan cakupan spasial yang luas dan kontinu, sehingga mampu menangkap variasi kondisi udara secara regional dengan lebih baik. Selain itu, penetapan IKU berbasis satelit juga dinilai lebih efisien dan hemat biaya dibandingkan dengan pengoperasian proses pengambilan sampel. Kecuali jika di daerah tersebut sudah terdapat jaringan stasiun pemantauan darat (*fixed station*) yang rapat dan melakukan pengamatan secara kontinu.

Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa peraturan yang berlaku saat ini di Indonesia belum mengakomodir penggunaan data satelit sebagai acuan resmi dalam penetapan IKU daerah. Oleh karena itu, perbedaan kategori IKU antara kedua sumber data ini sangat relevan untuk menunjukkan potensi sekaligus tantangan dalam mengintegrasikan teknologi penginderaan jauh ke dalam sistem pemantauan kualitas udara nasional.

***“Halaman sengaja dikosongkan”***

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian ini menganalisis distribusi spasial dan temporal polusi udara di Jabodetabek menggunakan data satelit Sentinel-5P untuk periode 2019–2023, dengan hasil utama sebagai berikut:

##### **1. Korelasi satelit– *in situ***

Data CO, NO<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> menunjukkan korelasi sedang hingga kuat terhadap data *in situ*, sehingga dapat dikoreksi dengan model regresi untuk meningkatkan akurasi. Sebaliknya SO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> memiliki korelasi sangat lemah hingga lemah, sehingga untuk SO<sub>2</sub> model regresi tidak dapat diaplikasikan, sementara untuk O<sub>3</sub> meskipun model regresi tetap dicoba, hasilnya dinilai tidak efektif dan tidak memadai untuk menghasilkan data yang akurat.

##### **2. Variabilitas musiman**

Dengan menerapkan penyaringan awan dan/atau koreksi regresi, data satelit dapat menangkap variasi konsentrasi gas rumah kaca (GRK) dan polutan yang dipengaruhi oleh fenomena El Nino maupun La Nina. Konsentrasi CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> cenderung meningkat pada musim kemarau (JJA) dan menurun pada musim hujan (DJF), dengan hotspot utama di kawasan perkotaan utara dan tengah Jabodetabek. Hanya variabel O<sub>3</sub> yang menunjukkan pola musiman yang tidak konsisten. Hal ini diduga karena produk Sentinel-5P untuk ozon merepresentasikan total kolom atmosfer, bukan ozon permukaan. Dengan demikian, variasi yang tertangkap satelit lebih dipengaruhi oleh dinamika stratosfer daripada konsentrasi ozon di lapisan troposfer yang relevan dengan fenomena musiman dan kualitas udara di permukaan.

##### **3. Variabilitas tahunan dan pengaruh ENSO**

Konsentrasi polutan meningkat pada tahun-tahun El Nino (2019, 2023) dan menurun pada periode La Nina (2020–2022). Anomali terjadi pada tahun 2021 (La

Nina moderat) dengan tingginya  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  dan juga  $\text{CH}_4$  di beberapa wilayah, yang kemungkinan dipengaruhi faktor lokal maupun pemulihan aktivitas pasca-pandemi.

#### 4. Indeks Kualitas Udara (IKU) 2019–2023

Secara umum Jabodetabek berada dalam kategori Baik–Sangat Baik. Tahun 2020 menunjukkan kualitas udara paling merata pada kategori Baik, dipengaruhi kombinasi La Nina dan penurunan aktivitas akibat pandemi COVID-19. Adanya perbedaan laporan tahunan dengan laporan Ditjen PPKL KLHK untuk DKI Jakarta, dimana IKU dari satelit berada satu level lebih rendah dari laporan Ditjen PPKL KLHK, hal ini dipengaruhi oleh metode pengambilan sampel yang jelas berbeda jauh. Namun pengukuran IKU dengan menggunakan data satelit perlu dipikirkan lagi karena lebih efisien.

#### 5. Potensi dan keterbatasan data satelit

Sentinel-5P efektif sebagai pelengkap pemantauan berbasis darat, terutama untuk CO dan  $\text{NO}_2$  setelah melalui penyaringan dan koreksi. Namun, data ini memiliki keterbatasan signifikan untuk polutan lain. Untuk  $\text{CH}_4$ , meskipun menunjukkan korelasi sedang, Sentinel-5P tidak dapat menangkap data dengan baik karena banyaknya piksel kosong (data hilang), sehingga secara umum data ini kurang andal (reliable) untuk digunakan. Keterbatasan yang lebih besar ditemukan pada  $\text{SO}_2$  dan terutama  $\text{O}_3$ , sehingga diperlukan algoritma retrieval yang lebih baik serta penguatan jaringan pemantauan *in situ* untuk validasi.

### 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian berikutnya meliputi:

1. Penelitian berikutnya sebaiknya memanfaatkan data kolom atmosfer tambahan (misalnya ECMWF reanalysis) untuk meningkatkan akurasi konversi satuan.
2. Konversi konsentrasi perlu mempertimbangkan kondisi suhu dan tekanan aktual, bukan konstanta tetap, agar hasil lebih representatif.

3. Perluasan stasiun pemantauan kualitas udara di Jabodetabek penting untuk validasi lebih kuat, terutama untuk polutan yang sulit ditangkap satelit seperti  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  serta  $\text{O}_3$ .
4. Perlu adanya analisis lanjutan untuk mengkaji anomali 2021, dengan mempertimbangkan faktor lokal (transportasi, industri, kebakaran lahan, dan kondisi meteorologi).

***“Halaman sengaja dikosongkan”***



## DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, Edvin, Karmini, M., & Budiman, B. (n.d.). *Adaptasi dan mitigasi perubahan iklim di Indonesia*. Pusat Perubahan Iklim dan Kualitas Udara Kedeputian Bidang Klimatologi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Baklanov, A., Molina, L. T., & Gauss, M. (2016). Megacities, air quality and climate. In *Atmospheric Environment* (Vol. 126). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>
- Borsdorff, T., Aan De Brugh, J., Hu, H., Hasekamp, O., Sussmann, R., Rettinger, M., Hase, F., Gross, J., Schneider, M., Garcia, O., Stremme, W., Grutter, M., Feist, Di. G., Arnold, S. G., De Mazière, M., Kumar Sha, M., Pollard, D. F., Kiel, M., Roehl, C., ... Landgraf, J. (2018). Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10), 5507–5518. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>
- Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Newman, M., Di Lorenzo, E., Yu, J. Y., Braconnot, P., Cole, J., Dewitte, B., Giese, B., Guilyardi, E., Jin, F. F., Karnauskas, K., Kirtman, B., Lee, T., Schneider, N., Xue, Y., & Yeh, S. W. (2015). Understanding enso diversity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(6). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00117.1>
- Chan, C. K., & Yao, X. (2008). Air pollution in mega cities in China. In *Atmospheric Environment* (Vol. 42, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>
- developers.google.com. (2019). *Earth Engine Data Catalog*. Earth Engine Data Catalog.
- Devlin, R. B., Duncan, K. E., Jardim, M., Schmitt, M. T., Rappold, A. G., & Diaz-Sanchez, D. (2012). Controlled exposure of healthy young volunteers to ozone causes cardiovascular effects. *Circulation*, 126(1), 104–111. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.112.094359>
- Fernanda, M. D., Sibero, H. T., & Mutiara, H. (2023). Polusi Udara dan Permasalahan terhadap Kulit. *Medical Profession Journal of Lampung*, 13(1).

- <https://doi.org/10.53089/medula.v13i1.590>
- Guo, L. C., Zhang, Y., Lin, H., Zeng, W., Liu, T., Xiao, J., Rutherford, S., You, J., & Ma, W. (2016). The washout effects of rainfall on atmospheric particulate pollution in two Chinese cities. *Environmental Pollution*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.003>
- Haack, B., & Rafter, A. (2010). Regression estimation techniques with remote sensing: A review and case study. In *Geocarto International* (Vol. 25, Issue 1). <https://doi.org/10.1080/10106040802711679>
- Hamzeh, N. H., Vuillaume, J.-F., & Ooi, M. C. G. (2023). Seasonal and long-term variability of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> in Tehran from 2010 to 2022. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(8). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11551-6>
- Haynes, W. M. (2013). CRC Handbook of Chemistry and Physics 2013-2014. *Journal of Structural Geology*, 33(2).
- Hoornweg, D., Sugar, L., & Gómez, C. L. T. (2011). Cities and greenhouse gas emissions: moving forward. *Environment and Urbanization*, 23(1). <https://doi.org/10.1177/0956247810392270>
- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>
- Ikram, N. M., Afifah, L., Arthatia, B. S., Wicaksono, S. J., Maharani, M., Ediyanto, Ihsanudin, T., & Apriyanti, D. (2022). Monitoring CO and O<sub>3</sub> concentration that caused climate change periodically using Google Earth Engine (study case: Java Island). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1047(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1047/1/012021>
- Kazemi Garajeh, M., Laneve, G., Rezaei, H., Sadeghnejad, M., Mohamadzadeh, N., & Salmani, B. (2023). Monitoring Trends of CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine. *Pollutants*, 3(2), 255–279. <https://doi.org/10.3390/pollutants3020019>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Air untuk Penentuan Status Mutu Air Sungai*.

- Kong, D., Liang, J., & Liu, C. (2022). Invisible enemy: The health impact of ozone. *China Economic Review*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2022.101760>
- Kusumaningtyas, S. D. A., Tonokura, K., Muharsyah, R., Gunawan, D., Sopaheluwakan, A., Iriana, W., Lestari, P., Permadi, D. A., Rahmawati, R., & Samputra, N. A. R. (2024). Comprehensive analysis of long-term trends, meteorological influences, and ozone formation sensitivity in the Jakarta Greater Area. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60374-2>
- Latsch, M., Richter, A., Eskes, H., Sneep, M., Wang, P., Veefkind, P., Lutz, R., Loyola, D., Argyrouli, A., Valks, P., Wagner, T., Sihler, H., Van Roozendaal, M., Theys, N., Yu, H., Siddans, R., & Burrows, J. P. (2022). Intercomparison of Sentinel-5P TROPOMI cloud products for tropospheric trace gas retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(21). <https://doi.org/10.5194/amt-15-6257-2022>
- Lead, C.-O., Ehrlert, D., Lead, M. P., Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P., Wang, M., Authors, C., Bernsten, T., Bey, I., Brasseur, G., Buja, L., Collins, W. J., ... Yantosca, R. (n.d.). *Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases 4 Contents*.
- Lefohn, A. S., Malley, C. S., Smith, L., Wells, B., Hazucha, M., Simon, H., Naik, V., Mills, G., Schultz, M. G., Paoletti, E., De Marco, A., Xu, X., Zhang, L., Wang, T., Neufeld, H. S., Musselman, R. C., Tarasick, D., Brauer, M., Feng, Z., ... Gerosa, G. (2018). Tropospheric ozone assessment report: Global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elementa*, 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.279>
- LELIEVELD, J., CRUTZEN, P. J., & DENTENER, F. J. (1998). Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50(2). <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1998.t01-1-00002.x>
- López, J. C., Quijano, G., Souza, T. S. O., Estrada, J. M., Lebrero, R., & Munoz, R. (2013). Biotechnologies for greenhouse gases (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub>) abatement: State of the art and challenges. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 97, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4734-z>

- Martin, R. V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. In *Atmospheric Environment* (Vol. 42, Issue 34).  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33(24), 4029–4037.
- Mikaloff Fletcher, S. E., Tans, P. P., Bruhwiler, L. M., Miller, J. B., & Heimann, M. (2004). CH<sub>4</sub> sources estimated from atmospheric observations of CH<sub>4</sub> and its <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C isotopic ratios: 2. Inverse modeling of CH<sub>4</sub> fluxes from geographical regions. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(4).  
<https://doi.org/10.1029/2004GB002224>
- mukhtar, R., Aprishanty, R., & Fauzi, R. (2018). PERHITUNGAN INDEKS KUALITAS UDARA DKI JAKARTA MENGGUNAKAN BERBAGAI BAKU MUTU. *Jurnal Ecolab*, 12(1).  
<https://doi.org/10.20886/jklh.2018.12.1.32-41>
- National Centers for Environmental Information. (2023). Meteorological Versus Astronomical Seasons. NOAA, 10 Maret 2023.  
<https://www.ncei.noaa.gov/news/meteorological-versus-astronomical-seasons>
- Nishihashi, M., Mukai, H., Terao, Y., Hashimoto, S., Osonoi, Y., Boer, R., Ardiansyah, M., Budianto, B., Immanuel, G. S., Rakhman, A., Nugroho, R., Suwedi, N., Rifai, A., Ihsan, I. M., Sulaiman, A., Gunawan, D., Suharguniyawan, E., Nugraha, M. S., Wattimena, R. C., & Ilahi, A. F. (2019). Greenhouse gases and air pollutants monitoring project around Jakarta megacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012038>
- Pazmino, A., Beekmann, M., Goutail, F., Ionov, D., Bazureau, A., Nunes-Pinharanda, M., Hauchecorne, A., & Godin-Beekmann, S. (2021). Impact of the COVID-19 pandemic related to lockdown measures on tropospheric NO<sub>2</sub> columns over Île-de-France. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(24).  
<https://doi.org/10.5194/acp-21-18303-2021>
- Petrescu, A. M. R., Van Huissteden, J., Jackowicz-Korczynski, M., Yurova, A., Christensen, T. R., Crill, P. M., Bäckstrand, K., & Maximov, T. C. (2008).

- Modelling CH<sub>4</sub> emissions from arctic wetlands: Effects of hydrological parameterization. *Biogeosciences*, 5(1). <https://doi.org/10.5194/bg-5-111-2008>
- Prather, M. J., & Zhu, X. (2024). Lifetimes and timescales of tropospheric ozone: Global metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elementa*, 12(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00112>
- Qu, Y., Zhang, C., Wang, D., Tian, P., Bai, W., Zhang, X., Zhang, P., Dai, H., & Wu, Q. (2013). Comparison of atmospheric CO<sub>2</sub> observed by GOSAT and two ground stations in China. *International Journal of Remote Sensing*, 34(11). <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.768362>
- Rustiadi, E., Pribadi, D. O., Pravitasari, A. E., Indraprahasta, G. S., & Iman, L. S. (2015). *Jabodetabek Megacity: From City Development Toward Urban Complex Management System*. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-55043-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55043-3_22)
- Savenets, M. (2021). Air pollution in ukraine: A view from the sentinel-5p satellite. *Idojaras*, 125(2). <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6>
- Suryanto, J., Amprin, & Anisum. (2023). VALIDASI CURAH HUJAN HARIAN CHIRPS PRECIPITATION SATELLITE PRODUCT DI PROVINSI KALIMANTAN BARAT. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian Dan Biosistem*, 11(1). <https://doi.org/10.29303/jrpb.v11i1.442>
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., ... Levelt, P. F. (2012). 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 Sensing of Environment*, 120, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Verhoelst, T., Compernelle, S., & ... (2020). Quality assessment of two years of Sentinel-5p TROPOMI NO<sub>2</sub> data. *EGU General ...*
- Vinutha, H. P., Poornima, B., & Sagar, B. M. (2018). Detection of outliers using interquartile range technique from intrusion dataset. *Advances in Intelligent*

- Systems and Computing*, 701. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7563-6\\_53](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7563-6_53)
- Wang, W., Liu, X., Bi, J., & Liu, Y. (2022). A machine learning model to estimate ground-level ozone concentrations in California using TROPOMI data and high-resolution meteorology. *Environment International*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106917>
- Wuensch, K. L., & Evans, J. D. (1996). Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences. *Journal of the American Statistical Association*, 91(436). <https://doi.org/10.2307/2291607>
- Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., & Ghanbari Parmehr, E. (2025). Estimation of Ozone and Nitrogen Dioxide Pollutants in Mazandaran Province Using Sentinel 5 Satellite Images. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 16(1), 56–66. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.07>

## LAMPIRAN

Kode Script Google Earth Engine (hanya melampirkan 5 script dari total 16 script yang digunakan)

### 1. Kode Script untuk Ekstraksi Nilai Piksel Citra Satelit Berdasarkan Titik Pengamatan *In Situ*

```
// Definisi lokasi dengan koordinat
var lokasiList = {
  'Cibeureum': ee.Geometry.Point([106.95, -6.71]),
  'IPB': ee.Geometry.Point([106.81, -6.60]),
  'Serpong': ee.Geometry.Point([106.67, -6.36])
};

// Definisi parameter dan faktor konversi (diperbaiki)
var paramList = {
  'NO2': {
    col: 'COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2',
    band: 'tropospheric_NO2_column_number_density',
    ugm3_factor: 4600.55, // M = 46.0055 * 100
    ppb_factor: 0.532 // Konversi µg/m³ ke ppb pada 25°C, 1 atm
  },
  'CO': {
    col: 'COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO',
    band: 'CO_column_number_density',
    ugm3_factor: 2801, // M = 28.01 * 100
    ppb_factor: 0.873 // Konversi µg/m³ ke ppb pada 25°C, 1 atm
  },
  'SO2': {
    col: 'COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2',
    band: 'SO2_column_number_density',
    ugm3_factor: 6406.6, // M = 64.066 * 100
    ppb_factor: 0.382 // Konversi µg/m³ ke ppb pada 25°C, 1 atm
  },
  'CH4': {
    col: 'COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4',
    band: 'CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air',
    ugm3_factor: 0.657, // 1 ppb CH4 ≈ 0.657 µg/m³ pada 25°C, 1 atm (M = 16.04)
    ppb_factor: 1 // CH4 sudah dalam ppb
  },
  'O3': {
    col: 'COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3',
    band: 'O3_column_number_density',
    ugm3_factor: 4800, // M ≈ 48 * 100
    ppb_factor: 0.51 // Konversi µg/m³ ke ppb pada 25°C, 1 atm
  }
};

// Muat shapefile Jabodetabek
```

```

var jabodetabek = ee.FeatureCollection('projects/firtsbayuferiaji/assets/jabodetabek');

// Daftar tahun untuk diekspor
var years = ee.List.sequence(2019, 2023);

// Koleksi NO2 untuk cloud_fraction proksi
var no2Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2');

// Fungsi untuk memproses data per parameter dan lokasi
var processData = function(year, lokasi, param) {
  var startDate = ee.Date.fromYMD(year, 1, 1);
  var endDate = ee.Date.fromYMD(year, 12, 31);

  var point = lokasiList[lokasi];
  var info = paramList[param];

  var collection = ee.ImageCollection(info.col)
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterBounds(point)
    .map(function(img) {
      var mean = img.reduceRegion({
        reducer: ee.Reducer.mean(),
        geometry: point.buffer(3500),
        scale: 1113.2, // Sesuaikan dengan resolusi ~7 km
        maxPixels: 1e13,
        bestEffort: true
      });

      var imgDate = img.date();
      var no2Image = no2Collection
        .filterDate(imgDate, imgDate.advance(1, 'day'))
        .filterBounds(point)
        .first();

      var cloud = ee.Algorithms.If(
        no2Image && no2Image.bandNames().contains('cloud_fraction'),
        no2Image.select('cloud_fraction').reduceRegion({
          reducer: ee.Reducer.mean(),
          geometry: point.buffer(3500),
          scale: 1113.2,
          maxPixels: 1e13,
          bestEffort: true
        }).get('cloud_fraction'),
        -999
      );

      var bandValue = mean.get(info.band);
      var molValue = ee.Algorithms.If(
        ee.Algorithms.IsEqual(bandValue, null),
        null,
        param === 'CH4' ? ee.Number(bandValue) : ee.Number(bandValue).max(0) // CH4 dalam
        ppb, lainnya mol/m²
      );

      var ugm3 = ee.Algorithms.If(
        molValue,
        ee.Number(molValue).multiply(info.ugm3_factor).max(0),

```



```

    null
  );

  var ppb = ee.Algorithms.If(
    ugm3,
    param === 'CH4' ? molValue : ee.Number(ugm3).multiply(info.ppb_factor).max(0),
    null
  );

  var qaValue = (param === 'NO2' || param === 'O3') ? ee.Algorithms.If(
    img.bandNames().contains('qa_value'),
    img.select('qa_value').reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      geometry: point.buffer(3500),
      scale: 1113.2,
      maxPixels: 1e13,
      bestEffort: true
    }).get('qa_value'),
    -999
  ) : -999;

  var qaAvailable = (param === 'NO2' || param === 'O3') ?
img.bandNames().contains('qa_value') : false;
  var cloudAvailable = no2Image ? no2Image.bandNames().contains('cloud_fraction') : false;

  return ee.Feature(null, {
    'date': img.date().format('YYYY-MM-dd'),
    'time_utc': img.get('system:time_start'),
    'value_mol_m2': param === 'CH4' ? null : molValue,
    'ug_m3': ugm3,
    'ppb': ppb,
    'cloud_fraction': cloud,
    'qa_value': qaValue,
    'qa_available': qaAvailable,
    'cloud_available': cloudAvailable,
    'lokasi': lokasi,
    'parameter': param
  });
})
.filter(ee.Filter.notNull(['ug_m3']));

return collection;
};

// Loop untuk ekspor CSV
years.evaluate(function(yearList) {
  yearList.forEach(function(year) {
    Object.keys(lokasiList).forEach(function(lokasi) {
      Object.keys(paramList).forEach(function(param) {
        var collection = processData(year, lokasi, param);

        Export.table.toDrive({
          collection: collection,
          description: param + '_' + lokasi + '_' + year,
          folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
          fileFormat: 'CSV',

```

```

        selectors: ['date', 'time_utc', 'lokasi', 'parameter', 'value_mol_m2', 'ug_m3', 'ppb',
'cloud_fraction', 'qa_value', 'qa_available', 'cloud_available']
    });
    });
    });
    });
});

// Ekspor visualisasi sebagai GeoTIFF
var jabodetabekImage = ee.Image().paint({featureCollection: jabodetabek, color:
1}).rename('jabodetabek');
Export.image.toDrive({
  image: jabodetabekImage,
  description: 'Jabodetabek_Boundary',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  scale: 1113.2,
  region: jabodetabek.geometry().bounds(),
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

var bufferImage = ee.Image().paint({
  featureCollection: ee.FeatureCollection(Object.keys(lokasiList).map(function(key) {
    return ee.Feature(lokasiList[key]).buffer(3500);
  })),
  color: 1
}).rename('buffer_3500m');
Export.image.toDrive({
  image: bufferImage,
  description: 'Buffer_3500m_Locations',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  scale: 1113.2,
  region: jabodetabek.geometry().bounds(),
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

var no2Image = no2Collection.filterDate('2019-01-01', '2019-12-31')
  .select('tropospheric_NO2_column_number_density')
  .mean()
  .multiply(paramList.NO2.ugm3_factor);
Export.image.toDrive({
  image: no2Image,
  description: 'NO2_2019_Average_ugm3',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  scale: 1113.2,
  region: jabodetabek.geometry().bounds(),
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

var ch4Image = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4')
  .filterDate('2019-01-01', '2019-12-31')
  .select('CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air')
  .mean()
  .multiply(paramList.CH4.ugm3_factor);
Export.image.toDrive({
  image: ch4Image,
  description: 'CH4_2019_Average_ugm3',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',

```

```

scale: 1113.2,
region: jabodetabek.geometry().bounds(),
fileFormat: 'GeoTIFF'
});

var o3Image = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3')
  .filterDate('2019-01-01', '2019-12-31')
  .select('O3_column_number_density')
  .mean()
  .multiply(paramList.O3.ugm3_factor);
Export.image.toDrive({
  image: o3Image,
  description: 'O3_2019_Average_ugm3',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  scale: 1113.2,
  region: jabodetabek.geometry().bounds(),
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

// Visualisasi di peta
Map.centerObject(lokasiList.Cibeureum, 10);
Map.addLayer(jabodetabek, {color: 'green', opacity: 0.5}, 'Jabodetabek Boundary');
Object.keys(lokasiList).forEach(function(key) {
  var point = lokasiList[key];
  Map.addLayer(point, {color: 'red'}, 'Lokasi ' + key);
  Map.addLayer(point.buffer(3500), {color: 'blue', opacity: 0.3}, 'Buffer 3.5 km ' + key);
});
Map.addLayer(no2Image, {min: 0, max: 100, palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'red']}, 'NO2
2019 Average (µg/m³)');
Map.addLayer(ch4Image, {min: 0, max: 2000, palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'red']}, 'CH4
2019 Average (µg/m³)');
Map.addLayer(o3Image, {min: 0, max: 300, palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'red']}, 'O3 2019
Average (µg/m³)');

```

## 2. Kode Script untuk Visualisasi Data Carbon Monoksida (CO) yang Diterapkan Filter *Cloud Fraction* dan Koreksi Regresi Serta Ekstraksi Nilai Pikselnya

```

// === SCRIPT VISUALISASI DAN KOREKSI REGRESI CO SENTINEL-5P ===
// Musiman + Tahunan 2019–2023 + Ekspor Statistik dan GeoTIFF

// === Area of Interest (AOI) ===
var aoi = ee.FeatureCollection("projects/firtsbayuferiaji/assets/jabodetabek");

// === Koleksi Data CO dan NO2 (cloud_fraction) ===
var coCollection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO')
  .select('CO_column_number_density');

var no2Cloud = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2')
  .select('cloud_fraction');

// === Faktor Konversi ===
var faktorUgm3 = 2801; // mol/m² ke µg/m³
var faktorPpb = 0.873; // µg/m³ ke ppb

```

```

// === Fungsi Join CO + Cloud Fraction (NO2) ===
function getFilteredCO(start, end) {
  var co = coCollection.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);
  var no2 = no2Cloud.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);

  var timeFilter = ee.Filter.equals({
    leftField: 'system:time_start',
    rightField: 'system:time_start'
  });

  var joined = ee.Join.inner().apply(co, no2, timeFilter);

  var filtered = ee.ImageCollection(joined.map(function(f) {
    var coImg = ee.Image(f.get('primary'));
    var cfImg = ee.Image(f.get('secondary')).select('cloud_fraction');
    var mask = cfImg.lt(0.1); // CF < 0.1
    return coImg.updateMask(mask).copyProperties(coImg, coImg.propertyNames());
  }));

  return filtered;
}

// === Fungsi Komposit Musiman ===
function seasonalComposite(startMonth, endMonth, year, label) {
  var start = ee.Date.fromYMD(year, startMonth, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(year, endMonth, 1).advance(1, 'month');
  var filtered = getFilteredCO(start, end);
  print('Jumlah citra CO untuk ' + label + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

  var co_ppb = filtered.mean().clip(aoi)
    .multiply(faktorUgm3)
    .multiply(faktorPpb);

  // Koreksi regresi:  $y = 2.178994x - 32.6807$ 
  var co_corrected = co_ppb.multiply(3.88).add(-56.38);

  return co_corrected.set({
    'label': label,
    'system:time_start': start.millis(),
    'jumlah_citra': filtered.size()
  });
}

// === Fungsi Komposit DJF ===
function djfComposite(year) {
  var start = ee.Date.fromYMD(year - 1, 12, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(year, 3, 1);
  var filtered = getFilteredCO(start, end);
  print('Jumlah citra CO untuk DJF ' + year + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

  var co_ppb = filtered.mean().clip(aoi)
    .multiply(faktorUgm3)
    .multiply(faktorPpb);

  var co_corrected = co_ppb.multiply(3.88).add(-56.38);

  return co_corrected.set({

```

```

    'label': 'DJF ' + year,
    'system:time_start': start.millis(),
    'jumlah_citra': filtered.size()
  });
}

// === Loop Tahun 2019–2023 ===
var semuaCitra = [];
for (var yr = 2019; yr <= 2023; yr++) {
  semuaCitra.push(djfComposite(yr));
  semuaCitra.push(seasonalComposite(3, 5, yr, 'MAM ' + yr));
  semuaCitra.push(seasonalComposite(6, 8, yr, 'JJA ' + yr));
  semuaCitra.push(seasonalComposite(9, 11, yr, 'SON ' + yr));

  var start = ee.Date.fromYMD(yr, 1, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(yr + 1, 1, 1);
  var filtered = getFilteredCO(start, end);
  print('Jumlah citra CO Tahunan ' + yr + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

  var co_ppb = filtered.mean().clip(aoi)
    .multiply(faktorUgm3)
    .multiply(faktorPpb);

  var co_corrected = co_ppb.multiply(3.88).add(-56.38);

  semuaCitra.push(co_corrected.set({
    'label': 'Tahunan ' + yr,
    'system:time_start': start.millis(),
    'jumlah_citra': filtered.size()
  }));
}

// === Visualisasi ===
var visParams = {
  min: 50,
  max: 450,
  palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'orange', 'red']
};

Map.centerObject(aoi, 9);
Map.addLayer(aoi, {color: 'green'}, 'Batas Jabodetabek');
semuaCitra.forEach(function(img) {
  img = ee.Image(img);
  img.get('label').evaluate(function(label) {
    Map.addLayer(img, visParams, label);
  });
});

// === Ekspor GeoTIFF ke Google Drive ===
semuaCitra.forEach(function(img) {
  img = ee.Image(img);
  img.get('label').evaluate(function(label) {
    var fileName = 'CO_Koreksi_' + label.replace(/ /g, '_');
    Export.image.toDrive({
      image: img,
      description: fileName,
      folder: 'TROPOMI_CO_KOREKSI',

```

```

        region: aoi.geometry(),
        scale: 3500,
        maxPixels: 1e13,
        fileFormat: 'GeoTIFF'
    });
});
});

// === Ekspor Statistik Piksel ke CSV ===
var daftarStatistik = ee.List(semuaCitra).map(function(image) {
    image = ee.Image(image);
    var label = ee.String(image.get('label'));
    var jumlah = ee.Number(image.get('jumlah_citra'));

    var stat = image.reduceRegion({
        reducer: ee.Reducer.mean().combine({
            reducer2: ee.Reducer.minMax(),
            sharedInputs: true
        }),
        geometry: aoi.geometry(),
        scale: 3500,
        maxPixels: 1e13
    });

    return ee.Feature(null, {
        'Label': label,
        'CO_ppb': ee.Number(stat.get('CO_column_number_density_mean')),
        'CO_ppb_max': ee.Number(stat.get('CO_column_number_density_max')),
        'CO_ppb_min': ee.Number(stat.get('CO_column_number_density_min')),
        'Jumlah_Citra': jumlah
    });
});

Export.table.toDrive({
    collection: ee.FeatureCollection(daftarStatistik),
    description: 'Statistik_CO_Koreksi_2019_2023',
    folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
    fileFormat: 'CSV',
    selectors: ['Label', 'CO_ppb', 'CO_ppb_max', 'CO_ppb_min', 'Jumlah_Citra']
});

```

### 3. Kode Script untuk Visualisasi Data Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>) yang Diterapkan Filter *Cloud Fraction* dan Koreksi Regresi Serta Ekstraksi Nilai Pikselnya

```

// === SCRIPT VISUALISASI DAN KOREKSI REGRESI NO2 SENTINEL-5P ===
// Musiman + Tahunan 2019–2023 + Ekspor Statistik dan GeoTIFF

// === AOI ===
var aoi = ee.FeatureCollection("projects/firtsbayuferiaji/assets/jabodetabek");

// === Koleksi Data NO2 dengan cloud_fraction ===
var no2Raw = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2')
    .select(['NO2_column_number_density', 'cloud_fraction']);

```

```

var faktorUgm3 = 4600.55;
var faktorPpb = 0.532;

// === Fungsi Filter Berdasarkan Cloud Fraction < 0.1 ===
function getFilteredNO2(start, end) {
  return no2Raw
    .filterDate(start, end)
    .filterBounds(aoi)
    .map(function(img) {
      return img.updateMask(img.select('cloud_fraction').lt(0.1));
    });
}

// === Fungsi Koreksi Regresi ===
function applyRegression(img) {
  return img.multiply(faktorUgm3)
    .multiply(faktorPpb)
    .multiply(26.35)
    .add(2.02); //y = 26.35x + 2.02
}

// === Fungsi Komposit Musiman ===
function seasonalComposite(startMonth, endMonth, year, label) {
  var start = ee.Date.fromYMD(year, startMonth, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(year, endMonth, 1).advance(1, 'month');
  var filtered = getFilteredNO2(start, end);
  print('Jumlah citra NO2 untuk ' + label + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

  var meanImg = filtered.select('NO2_column_number_density').mean().clip(aoi);
  var corrected = applyRegression(meanImg);
  return corrected.set('label', label, 'system:time_start', start.millis());
}

// === Fungsi DJF ===
function djfComposite(year) {
  var start = ee.Date.fromYMD(year - 1, 12, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(year, 3, 1);
  var filtered = getFilteredNO2(start, end);
  print('Jumlah citra NO2 untuk DJF ' + year + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

  var meanImg = filtered.select('NO2_column_number_density').mean().clip(aoi);
  var corrected = applyRegression(meanImg);
  return corrected.set('label', 'DJF ' + year, 'system:time_start', start.millis());
}

// === Loop Tahun ===
var semuaCitra = [];
for (var yr = 2019; yr <= 2023; yr++) {
  semuaCitra.push(djfComposite(yr));
  semuaCitra.push(seasonalComposite(3, 5, yr, 'MAM ' + yr));
  semuaCitra.push(seasonalComposite(6, 8, yr, 'JJA ' + yr));
  semuaCitra.push(seasonalComposite(9, 11, yr, 'SON ' + yr));

  var start = ee.Date.fromYMD(yr, 1, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(yr + 1, 1, 1);
  var filtered = getFilteredNO2(start, end);
  print('Jumlah citra NO2 untuk Tahunan ' + yr + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());
}

```

```

var meanImg = filtered.select('NO2_column_number_density').mean().clip(aoi);
var corrected = applyRegression(meanImg);
semuaCitra.push(corrected.set('label', 'Tahunan ' + yr, 'system:time_start', start.millis()));
}

// === Visualisasi Peta ===
var visParams = {
  min: 2,
  max: 20,
  palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'orange', 'red']
};

Map.centerObject(aoi, 9);
Map.addLayer(aoi, {color: 'green'}, 'Batas Jabodetabek');
semuaCitra.forEach(function(img) {
  img = ee.Image(img);
  img.get('label').evaluate(function(label) {
    Map.addLayer(img, visParams, label);
  });
});

// === Ekspor GeoTIFF ===
semuaCitra.forEach(function(img) {
  img = ee.Image(img);
  img.get('label').evaluate(function(label) {
    var fileName = 'NO2_corr_' + label.replace(/ /g, '_');
    Export.image.toDrive({
      image: img,
      description: fileName,
      folder: 'TROPOMI_NO2_GeoTIFF_Corrected',
      region: aoi.geometry(),
      scale: 3500,
      maxPixels: 1e13,
      fileFormat: 'GeoTIFF'
    });
  });
});

// === Ekspor Statistik ke CSV ===
var daftarStatistik = ee.List(semuaCitra).map(function(image) {
  image = ee.Image(image);
  var label = ee.String(image.get('label'));
  var stat = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean().combine({
      reducer2: ee.Reducer.minMax(),
      sharedInputs: true
    }),
    geometry: aoi.geometry(),
    scale: 3500,
    maxPixels: 1e13
  });
  return ee.Feature(null, {
    'Label': label,
    'NO2_ppb_corr': stat.get('NO2_column_number_density_mean'),
    'NO2_ppb_corr_max': stat.get('NO2_column_number_density_max'),
  });
});

```



```

    'NO2_ppb_corr_min': stat.get('NO2_column_number_density_min')
  });
});

Export.table.toDrive({
  collection: ee.FeatureCollection(daftarStatistik),
  description: 'RataRata_NO2_ppb_Corrected_Cloud0.1_2019_2023',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  fileFormat: 'CSV',
  selectors: ['Label', 'NO2_ppb_corr', 'NO2_ppb_corr_max', 'NO2_ppb_corr_min']
});

```

#### 4. Kode Script untuk Visualisasi Data Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) yang Diterapkan Filter *Cloud Fraction* tanpa Koreksi Regresi Serta Ekstraksi Nilai Pikselnya

```

// === SCRIPT VISUALISASI DAN KOREKSI REGRESI SO2 SENTINEL-5P ===
// Musiman + Tahunan 2019–2023 + Ekspor Statistik dan GeoTIFF
// === AOI ===
var aoi = ee.FeatureCollection("projects/firtsbayuferiaji/assets/jabodetabek");

// === Koleksi Data ===
var so2Raw = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2')
  .select('SO2_column_number_density');
var no2Cloud = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2')
  .select('cloud_fraction');

var faktorUgm3 = 6406.6;
var faktorPpb = 0.382;

// === Fungsi Join SO2 dengan cloud_fraction dari NO2 ===
function getFilteredSO2(start, end) {
  var so2 = so2Raw.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);
  var no2 = no2Cloud.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);

  var timeFilter = ee.Filter.equals({
    leftField: 'system:time_start',
    rightField: 'system:time_start'
  });

  var joined = ee.Join.inner().apply(so2, no2, timeFilter);

  var filtered = ee.ImageCollection(joined.map(function(f) {
    var so2Img = ee.Image(f.get('primary'));
    var cfImg = ee.Image(f.get('secondary')).select('cloud_fraction');
    var mask = cfImg.lt(0.1); // <= DIUBAH KE 0.1
    return so2Img.updateMask(mask)
      .copyProperties(so2Img, so2Img.propertyNames());
  }));

  return filtered;
}

// === Komposit Musiman ===
function seasonalComposite(startMonth, endMonth, year, label) {

```

```

var start = ee.Date.fromYMD(year, startMonth, 1);
var end = ee.Date.fromYMD(year, endMonth, 1).advance(1, 'month');
var filtered = getFilteredSO2(start, end);
print('Jumlah citra SO2 untuk ' + label + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

var meanImg = filtered.mean().clip(aoi)
    .multiply(faktorUgm3)
    .multiply(faktorPpb)
    .set('label', label, 'system:time_start', start.millis());
return meanImg;
}

// === Komposit DJF ===
function djfComposite(year) {
var start = ee.Date.fromYMD(year - 1, 12, 1);
var end = ee.Date.fromYMD(year, 3, 1);
var filtered = getFilteredSO2(start, end);
print('Jumlah citra SO2 untuk DJF ' + year + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

var meanImg = filtered.mean().clip(aoi)
    .multiply(faktorUgm3)
    .multiply(faktorPpb)
    .set('label', 'DJF ' + year, 'system:time_start', start.millis());
return meanImg;
}

// === Loop Tahun ===
var semuaCitra = [];
for (var yr = 2019; yr <= 2023; yr++) {
    semuaCitra.push(djfComposite(yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(3, 5, yr, 'MAM ' + yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(6, 8, yr, 'JJA ' + yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(9, 11, yr, 'SON ' + yr));

    var start = ee.Date.fromYMD(yr, 1, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(yr + 1, 1, 1);
    var filtered = getFilteredSO2(start, end);
    print('Jumlah citra SO2 untuk Tahunan ' + yr + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var tahunan = filtered.mean().clip(aoi)
        .multiply(faktorUgm3)
        .multiply(faktorPpb)
        .set('label', 'Tahunan ' + yr, 'system:time_start', start.millis());
    semuaCitra.push(tahunan);
}

// === Visualisasi Peta ===
var visParams = {
    min: 0,
    max: 6,
    palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'orange', 'red']
};

Map.centerObject(aoi, 9);
Map.addLayer(aoi, {color: 'green'}, 'Batas Jabodetabek');
semuaCitra.forEach(function(img) {
    img = ee.Image(img);

```

```

img.get('label').evaluate(function(label) {
  Map.addLayer(img, visParams, label);
});
});

// === Ekspor GeoTIFF ===
semuaCitra.forEach(function(img) {
  img = ee.Image(img);
  img.get('label').evaluate(function(label) {
    var fileName = 'SO2_' + label.replace(/ /g, '_');
    Export.image.toDrive({
      image: img,
      description: fileName,
      folder: 'TROPOMI_SO2_GeoTIFF',
      region: aoi.geometry(),
      scale: 3500,
      maxPixels: 1e13,
      fileFormat: 'GeoTIFF'
    });
  });
});

// === Ekspor Statistik CSV ===
var daftarStatistik = ee.List(semuaCitra).map(function(image) {
  image = ee.Image(image);
  var label = ee.String(image.get('label'));
  var stat = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean().combine({
      reducer2: ee.Reducer.minMax(),
      sharedInputs: true
    }),
    geometry: aoi.geometry(),
    scale: 3500,
    maxPixels: 1e13
  });

  return ee.Feature(null, {
    'Label': label,
    'SO2_ppb': ee.Number(stat.get('SO2_column_number_density_mean')),
    'SO2_ppb_max': ee.Number(stat.get('SO2_column_number_density_max')),
    'SO2_ppb_min': ee.Number(stat.get('SO2_column_number_density_min'))
  });
});

Export.table.toDrive({
  collection: ee.FeatureCollection(daftarStatistik),
  description: 'Statistik_SO2_ppb_Musiman_Tahunan_2019_2023_01',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  fileFormat: 'CSV',
  selectors: ['Label', 'SO2_ppb', 'SO2_ppb_max', 'SO2_ppb_min']
});

```

5. Kode Script untuk Visualisasi Data Metana (CH<sub>4</sub>) yang Diterapkan Filter *Cloud Fraction* dan Koreksi Regresi Serta Ekstraksi Nilai Pikselnya

```

// === SCRIPT VISUALISASI DAN KOREKSI REGRESI CH4 SENTINEL-5P ===
// Musiman + Tahunan 2019–2023 + Ekspor Statistik dan GeoTIFF

// === Area of Interest (AOI) ===
var aoi = ee.FeatureCollection("projects/firtsbayuferiaji/assets/jabodetabek");

// === Koleksi Data CH4 dan NO2 (cloud_fraction) ===
var ch4Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4')
    .select('CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air');

var no2Cloud = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2')
    .select('cloud_fraction');

// === Faktor Konversi (Informasi) ===
var faktorUgm3 = 0.657; // 1 ppb CH4 ≈ 0.657 µg/m³
var faktorPpb = 1; // Data CH4 sudah dalam ppb

// === Fungsi Join CH4 + Cloud Fraction (NO2) ===
function getFilteredCH4(start, end) {
    var ch4 = ch4Collection.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);
    var no2 = no2Cloud.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);

    var timeFilter = ee.Filter.equals({
        leftField: 'system:time_start',
        rightField: 'system:time_start'
    });

    var joined = ee.Join.inner().apply(ch4, no2, timeFilter);

    var filtered = ee.ImageCollection(joined.map(function(f) {
        var ch4Img = ee.Image(f.get('primary'));
        var cfImg = ee.Image(f.get('secondary')).select('cloud_fraction');
        var mask = cfImg.lt(0.1); // CF < 0.1
        return ch4Img.updateMask(mask).copyProperties(ch4Img, ch4Img.propertyNames());
    }));

    return filtered;
}

// === Fungsi Komposit Musiman ===
function seasonalComposite(startMonth, endMonth, year, label) {
    var start = ee.Date.fromYMD(year, startMonth, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(year, endMonth, 1).advance(1, 'month');
    var filtered = getFilteredCH4(start, end);
    print('Jumlah citra CH4 untuk ' + label + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var ch4_ppb = filtered.mean().clip(aoi);
    var ch4_corrected = ch4_ppb.multiply(1.02).add(74.03); // y = 74.03 + 1.02x

    return ch4_corrected.set({
        'label': label,
        'system:time_start': start.millis(),
        'jumlah_citra': filtered.size()
    });
}

```

```

    });
}

// === Fungsi Komposit DJF ===
function djfComposite(year) {
    var start = ee.Date.fromYMD(year - 1, 12, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(year, 3, 1);
    var filtered = getFilteredCH4(start, end);
    print('Jumlah citra CH4 untuk DJF ' + year + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var ch4_ppb = filtered.mean().clip(aoi);
    var ch4_corrected = ch4_ppb.multiply(1.02).add(74.03);

    return ch4_corrected.set({
        'label': 'DJF ' + year,
        'system:time_start': start.millis(),
        'jumlah_citra': filtered.size()
    });
}

// === Loop Tahun 2019–2023 ===
var semuaCitra = [];
for (var yr = 2019; yr <= 2023; yr++) {
    semuaCitra.push(djfComposite(yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(3, 5, yr, 'MAM ' + yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(6, 8, yr, 'JJA ' + yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(9, 11, yr, 'SON ' + yr));

    var start = ee.Date.fromYMD(yr, 1, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(yr + 1, 1, 1);
    var filtered = getFilteredCH4(start, end);
    print('Jumlah citra CH4 Tahunan ' + yr + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var ch4_ppb = filtered.mean().clip(aoi);
    var ch4_corrected = ch4_ppb.multiply(1.02).add(74.03);

    semuaCitra.push(ch4_corrected.set({
        'label': 'Tahunan ' + yr,
        'system:time_start': start.millis(),
        'jumlah_citra': filtered.size()
    }));
}

// === Visualisasi ===
var visParams = {
    min: 1800,
    max: 2100,
    palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'orange', 'red']
};

Map.centerObject(aoi, 9);
Map.addLayer(aoi, {color: 'green'}, 'Batas Jabodetabek');
semuaCitra.forEach(function(img) {
    img = ee.Image(img);
    img.get('label').evaluate(function(label) {
        Map.addLayer(img, visParams, label);
    });
});

```

```

});

// === Ekspor GeoTIFF ke Google Drive ===
semuaCitra.forEach(function(img) {
  img = ee.Image(img);
  img.get('label').evaluate(function(label) {
    var fileName = 'CH4_Koreksi_' + label.replace(/ /g, '_');
    Export.image.toDrive({
      image: img,
      description: fileName,
      folder: 'TROPOMI_CH4_KOREKSI',
      region: aoi.geometry(),
      scale: 3500,
      maxPixels: 1e13,
      fileFormat: 'GeoTIFF'
    });
  });
});

// === Ekspor Statistik Piksel ke CSV ===
var daftarStatistik = ee.List(semuaCitra).map(function(image) {
  image = ee.Image(image);
  var label = ee.String(image.get('label'));
  var jumlah = ee.Number(image.get('jumlah_citra'));

  var stat = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean().combine({
      reducer2: ee.Reducer.minMax(),
      sharedInputs: true
    }),
    geometry: aoi.geometry(),
    scale: 3500,
    maxPixels: 1e13
  });

  return ee.Feature(null, {
    'Label': label,
    'CH4_ppb': ee.Number(stat.get('CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air_mean')),
    'CH4_ppb_max': ee.Number(stat.get('CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air_max')),
    'CH4_ppb_min': ee.Number(stat.get('CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air_min')),
    'Jumlah_Citra': jumlah
  });
});

Export.table.toDrive({
  collection: ee.FeatureCollection(daftarStatistik),
  description: 'Statistik_CH4_Koreksi_2019_2023',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  fileFormat: 'CSV',
  selectors: ['Label', 'CH4_ppb', 'CH4_ppb_max', 'CH4_ppb_min', 'Jumlah_Citra']
});

```

## 6. Kode Script untuk Visualisasi Data Ozon (O<sub>3</sub>) yang Diterapkan Filter *Cloud*

*Fraction* dan Koreksi Regresi Serta Ekstraksi Nilai Pikselnya

```

// === SCRIPT VISUALISASI DAN KOREKSI REGRESI O3 SENTINEL-5P ===
// Musiman + Tahunan 2019–2023 + Ekspor Statistik dan GeoTIFF
// === AOI ===
var aoi = ee.FeatureCollection("projects/firtsbayuferiaji/assets/jabodetabek");

// === Koleksi Data ===
var o3Raw = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3')
    .select('O3_column_number_density');
var no2Cloud = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2')
    .select('cloud_fraction');

var faktorUgm3 = 4800; // Konversi mol/m² ke µg/m³ untuk O3
var faktorPpb = 0.51; // Konversi µg/m³ ke ppb pada 25°C, 1 atm

// === Fungsi Koreksi Regresi ===
// y = -137.96 + 0.58x
function koreksiRegresi(ppbImg) {
    return ppbImg.multiply(0.58).add(-137.96).rename('O3_ppb_corrected');
}

// === Fungsi Join O3 dengan cloud_fraction dari NO2 ===
function getFilteredO3(start, end) {
    var o3 = o3Raw.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);
    var no2 = no2Cloud.filterDate(start, end).filterBounds(aoi);

    var timeFilter = ee.Filter.equals({
        leftField: 'system:time_start',
        rightField: 'system:time_start'
    });

    var joined = ee.Join.inner().apply(o3, no2, timeFilter);

    var filtered = ee.ImageCollection(joined.map(function(f) {
        var o3Img = ee.Image(f.get('primary'));
        var cfImg = ee.Image(f.get('secondary')).select('cloud_fraction');
        var mask = cfImg.lt(0.1); // <== Cloud fraction < 0.1
        return o3Img.updateMask(mask)
            .copyProperties(o3Img, o3Img.propertyNames());
    }));

    return filtered;
}

// === Komposit Musiman ===
function seasonalComposite(startMonth, endMonth, year, label) {
    var start = ee.Date.fromYMD(year, startMonth, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(year, endMonth, 1).advance(1, 'month');
    var filtered = getFilteredO3(start, end);
    print('Jumlah citra O3 untuk ' + label + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var meanImg = filtered.mean().clip(aoi)
        .multiply(faktorUgm3)
        .multiply(faktorPpb);
    var corrected = koreksiRegresi(meanImg)
        .set('label', label, 'system:time_start', start.millis());
}

```

```

    return corrected;
}

// === Komposit DJF ===
function djfComposite(year) {
    var start = ee.Date.fromYMD(year - 1, 12, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(year, 3, 1);
    var filtered = getFilteredO3(start, end);
    print('Jumlah citra O3 untuk DJF ' + year + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var meanImg = filtered.mean().clip(aoi)
        .multiply(faktorUgm3)
        .multiply(faktorPpb);
    var corrected = koreksiRegresi(meanImg)
        .set('label', 'DJF ' + year, 'system:time_start', start.millis());
    return corrected;
}

// === Loop Tahun ===
var semuaCitra = [];
for (var yr = 2019; yr <= 2023; yr++) {
    semuaCitra.push(djfComposite(yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(3, 5, yr, 'MAM ' + yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(6, 8, yr, 'JJA ' + yr));
    semuaCitra.push(seasonalComposite(9, 11, yr, 'SON ' + yr));

    var start = ee.Date.fromYMD(yr, 1, 1);
    var end = ee.Date.fromYMD(yr + 1, 1, 1);
    var filtered = getFilteredO3(start, end);
    print('Jumlah citra O3 untuk Tahunan ' + yr + ' (cloud_fraction < 0.1):', filtered.size());

    var tahunan = filtered.mean().clip(aoi)
        .multiply(faktorUgm3)
        .multiply(faktorPpb);
    var corrected = koreksiRegresi(tahunan)
        .set('label', 'Tahunan ' + yr, 'system:time_start', start.millis());
    semuaCitra.push(corrected);
}

// === Visualisasi Peta ===
var visParams = {
    min: 17.0,
    max: 42.0,
    palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'orange', 'red']
};

Map.centerObject(aoi, 9);
Map.addLayer(aoi, {color: 'green'}, 'Batas Jabodetabek');
semuaCitra.forEach(function(img) {
    img = ee.Image(img);
    img.get('label').evaluate(function(label) {
        Map.addLayer(img, visParams, label + ' (Corrected)');
    });
});

// === Ekspor GeoTIFF ===
semuaCitra.forEach(function(img) {

```



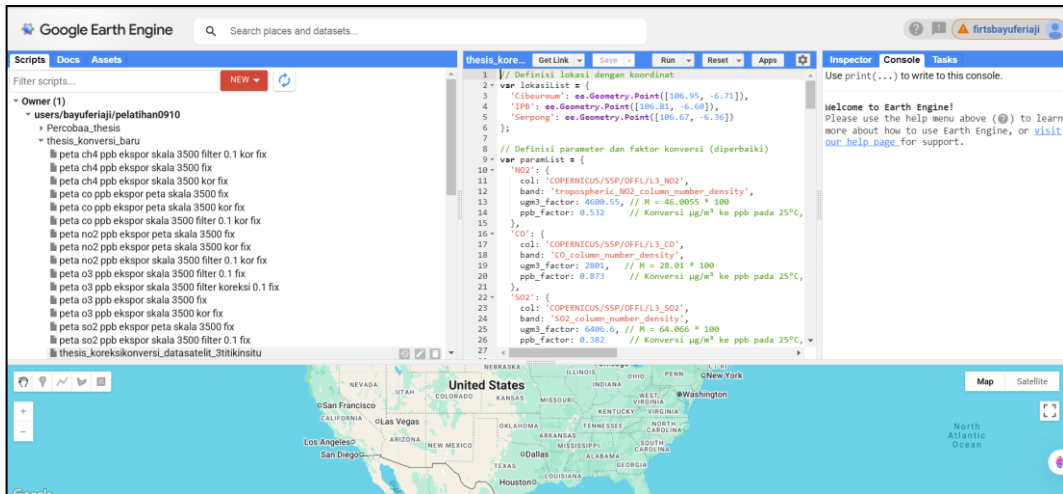
```

img = ee.Image(img);
img.get('label').evaluate(function(label) {
  var fileName = 'O3_' + label.replace(/ /g, '_') + '_Corrected';
  Export.image.toDrive({
    image: img,
    description: fileName,
    folder: 'TROPOMI_O3_GeoTIFF',
    region: aoi.geometry(),
    scale: 3500,
    maxPixels: 1e13,
    fileFormat: 'GeoTIFF'
  });
});
});

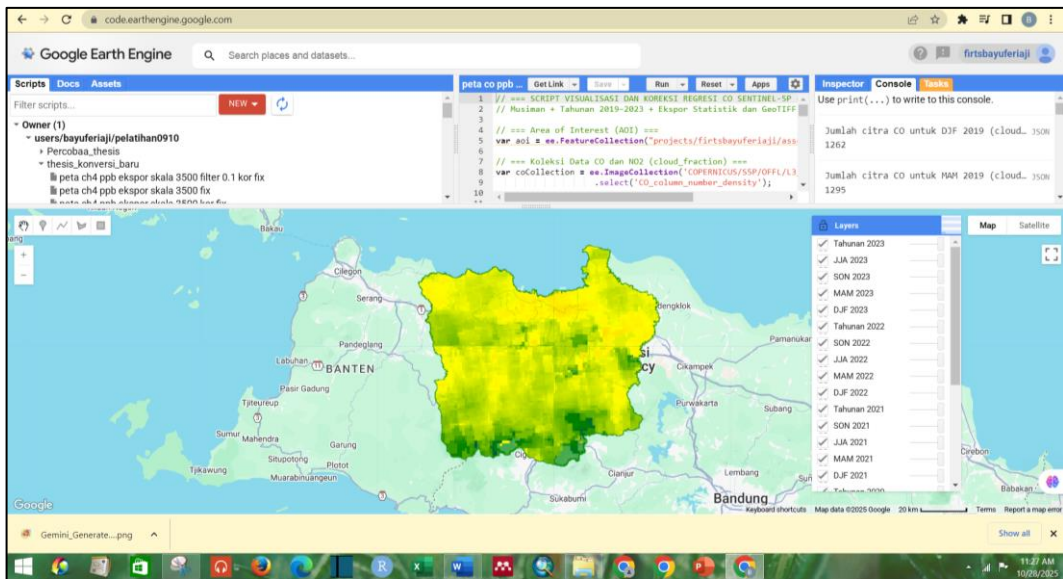
// === Ekspor Statistik CSV ===
var daftarStatistik = ee.List(semuaCitra).map(function(image) {
  image = ee.Image(image);
  var label = ee.String(image.get('label'));
  var stat = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean().combine({
      reducer2: ee.Reducer.minMax(),
      sharedInputs: true
    }),
    geometry: aoi.geometry(),
    scale: 3500,
    maxPixels: 1e13
  });
  return ee.Feature(null, {
    'Label': label,
    'O3_ppb_corrected': ee.Number(stat.get('O3_ppb_corrected_mean')),
    'O3_ppb_corrected_max': ee.Number(stat.get('O3_ppb_corrected_max')),
    'O3_ppb_corrected_min': ee.Number(stat.get('O3_ppb_corrected_min'))
  });
});

Export.table.toDrive({
  collection: ee.FeatureCollection(daftarStatistik),
  description: 'Statistik_O3_ppb_Corrected_Musiman_Tahunan_2019_2023',
  folder: 'TROPOMI_Validasi_InSitu',
  fileFormat: 'CSV',
  selectors: ['Label', 'O3_ppb_corrected', 'O3_ppb_corrected_max', 'O3_ppb_corrected_min']
});

```



Tangkapan Gambar Pengelolaan Data Satelit Pada Google Earth Engine



Tangkapan Gambar Pengelolaan Data Satelit Sentinel 5P Parameter CO pada Google Earth Engine

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta, 20 Februari 1988, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Jatibening Raya, SLTPN 17 dan SMAN 5 Kota Bekasi. Setelah lulus dari pendidikan menengah atas pada tahun 2006, penulis melanjutkan pendidikan di Program Diploma-3 Meteorologi di Akademi Meteorologi dan Geofisika (AMG) pada tahun 2006, dan menyelesaikan studi S1 jurusan Teknik Informatika di Universitas Attahiriyah Jakarta pada tahun 2015. Penulis bekerja di BMKG sejak tahun 2009 dengan penempatan pertama di Stasiun Meteorologi Tanjungpandan Belitung, kemudian pindah ke Pos Polusi Udara Cibeureum di bawah Stasiun Meteorologi Citeko Bogor sebagai Pengamat Meteorologi dan Geofisika. Saat ini penulis melanjutkan studi S2 di Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, Dan Kebumihutan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Judul tesis yang diajukan oleh penulis “Studi Konsentrasi Unsur Gas Rumah Kaca dan Polutan dari Data Satelit di Wilayah Jabodetabek” karena tema tersebut sesuai dengan pekerjaan yang dilakukan oleh penulis di BMKG.