

Spatio-Temporal Analysis Polutan Karbon Monoksida (CO) Jakarta Selama Pandemi Menggunakan Sentinel-5P TROPOMI

Hertanto Suryoprayogo ^{#1}, Ade Rahmat Iskandar^{*2}, Demi Adidrana^{*3}

*Faculty of Engineering, Institut Teknologi Telkom Jakarta
Jl. Raya Daan Mogot No.KM. 11, Kota Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia*

¹ hertanto@ittelkom-jkt.ac.id

Abstract

Memahami kualitas udara secara jangka panjang merupakan salah satu tantangan besar. Saat ini DKI Jakarta termasuk kota dengan tingkat mobilisasi dan polusi yang paling tinggi. Namun tingkat polusi menurun sejak Covid-19 menyebar di Indonesia. Karbon dioksida (CO) sebagai salah satu polutan yang banyak dihasilkan dari sisa pembakaran kendaraan bermotor diteliti untuk melihat pengaruh adanya pembatasan kegiatan masyarakat selama pandemi dengan tingginya konsentrasi CO. Data citra satelit Sentinel-5P Tropomi diolah menggunakan Google Earth Engine untuk memonitoring kadar ambien CO. Spatio-temporal analysis dilakukan sebagai pendekatan dalam menganalisis data time series. Pola spatio temporal menunjukkan nilai konsentrasi vertical CO yang menurun jika dibandingkan sebelum terjadinya pandemi hingga 30%, dengan nilai koefisien regresi $y = -0,2415x + 35,961$ dan $R^2 = 0,1456$.

Keywords: *Kualitas Udara, Karbon Monoksida, Sentinel-5P, Google Earth Engine, Climate Change*

I. INTRODUCTION

Pandemi Covid-19 yang menyerang hampir seluruh bagian negara di dunia termasuk di Indonesia. Selama kurang lebih 2 tahun, pandemi yang berlangsung memberikan dampak yang besar pada semua sector kehidupan manusia. Berbagai kebijakan pemerintah diterapkan dalam menekan angka persebaran virus Covid-19 di Indonesia. Dimana pembatasan kegiatan masyarakat seperti pada regulasi perjalanan, jam operasional kantor dan instansi, serta kebijakan untuk bekerja dari rumah (Work From Home) telah memperlambat penyebaran COVID-19. [1]. Sebagai ibu kota negara Indonesia, Provinsi DKI Jakarta menjadi sentral kegiatan ekonomi dan industri nasional. Hal tersebut secara tidak langsung menyebabkan pertumbuhan penduduk dan tingkat urbanisasi di Jakarta meningkat. Dimana, tingginya kepadatan penduduk juga sebanding dengan meningkatnya kepadatan transportasi. Mobilisasi kegiatan masyarakat menggunakan alat transportasi akan menghasilkan gas sisa pembuangan dari asap kendaraan bermotor yang menimbulkan polusi dan dapat mempengaruhi tingkat kualitas udara yang sehat. Penyebab utama pencemaran udara termasuk pembangunan ekonomi, urbanisasi, konsumsi energi, transportasi dan motorisasi, serta peningkatan pesat populasi perkotaan [2]. Karbon Monoksida (CO) yang termasuk dalam parameter polutan banyak dihasilkan melalui hasil pembakaran bahan bakar akibat aktivitas manusia seperti pembuangan gas buang kendaraan bermotor [3][4]. Seiring dengan diberlakukannya pembatasan kegiatan akibat lockdown selama pandemi, secara tidak langsung juga berdampak pada menurunnya mobilitas kendaraan bermotor di DKI Jakarta

Dalam menentukan polutan dan kualitas udara di Indonesia, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mengatur sebuah standar yang tertuang melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14

tahun 2020, tentang Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). ISPU merupakan sebuah baku mutu yang mengukur kualitas ambien udara di suatu wilayah. Melalui ISPU, korelasi antara sumber pencemaran udara dan akibat yang ditimbulkan dapat diukur, sehingga factor yang mempengaruhi kesehatan mahluk hidup dan manusia dapat diketahui. Perhitungan ISPU meliputi 7 (tujuh) parameter yaitu: partikulat PM10, partikulat PM2.5, Nitrogen Dioksida (NO₂), Sulfur Dioksida (SO₂), Karbon Monoksida (CO), Ozon (O₃), dan Hidrokarbon (HC). [5]

Selama beberapa tahun sebelumnya, sejumlah penelitian dilakukan untuk mengukur tingkat kualitas udara pada suatu wilayah menggunakan penginderaan jauh satelit (Remote Sensing) [6]. Melalui spektrum elektromagnetik Satelit, informasi Geospasial pada permukaan serta atmosfer bumi dapat ditangkap, diolah serta dianalisis, dalam band visible (VIS) dan infrared (IR) secara time series, dan near-real time [7][8][9].

Perkembangan teknologi perangkat lunak memberikan kemudahan dalam mengolah dan melakukan berbagai analisis data Geospasial. Namun besarnya dataset seringkali menimbulkan keterbatasan dalam pengolahan data. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam menangani Big Data adalah melalui teknologi Cloud Computing. Google Earth Engine (GEE) merupakan salah satu teknologi cloud computational machine yang dapat digunakan dalam melakukan analisis spasial serta pengambilan keputusan. GEE digunakan untuk menautkan, menyimpan, mengolah, melakukan pemrosesan, serta pemrograman data Geospasial berskala besar (Big Data) seperti data satelit, vektor, iklim, demografi, cuaca, maupun data model elevasi digital (DEM). Melalui Front-end berbasis web live code bagi developer, analisis spasial secara interaktif dapat dilakukan menggunakan database cloud, sehingga memberikan kemudahan bagi developer dalam mengembangkan algoritma sebagai metode decision making. [10][11]

GEE dapat digunakan dalam menganalisis climate change [12], mengukur NO [1][13] maupun CO [4] selama masa lockdown pandemi. Dalam penelitian ini, data CO troposfer diolah menggunakan data Satelit Sentinel-5 Prekursor (Sentinel-5P). Sentinel-5P merupakan satelit yang mengorbit rendah di Bumi dalam jangka waktu 2015–2022, menyediakan informasi global harian yang berkaitan dengan kualitas udara, konsentrasi gas dan aerosol, tekanan iklim, serta lapisan ozon. Sentinel-5P dilengkapi dengan Instrumen Pemantauan Troposfer Tropomi (TROPOspheric Monitoring Instrument) yang dapat digunakan untuk memantau konstituen atmosfer utama termasuk polusi udara, sifat ozon, dan aerosol pada lapisan atmosfer bumi [14]. TROPOMI pada satelit Sentinel 5 Precursor (S-5P) mengamati kelimpahan global CO₂ yang memanfaatkan pengukuran pancaran Bumi pada langit cerah dan langit mendung dalam rentang spektral 2,3 m dari bagian inframerah gelombang pendek (SWIR) dari spektrum matahari [2][15][16].

Spektrometer TROPOMI terdiri atas spectral band pada gelombang ultraviolet (UV), visible (VIS), Near-infrared (NIR) dan Shortwave Infrared (SWIR). Panjang serta rentang gelombang TROPOMI tersebut memungkinkan pengamatan atmosfer utama, yang meliputi Ozon (O₃), Nitrogen Dioksida (NO₂), Karbon Monoksida (CO), Sulfur Dioksida (SO₂), Metana (CH₄), Formaldehida (CH₂O), Aerosol dan Awan [Veeffkind]. Disamping itu Tropomi bertujuan dalam mengembangkan memodelkan dan asimilasi data kualitas udara dalam mendukung layanan operasional termasuk pemantauan dan prakiraan kualitas udara yang mendekati waktu nyata (Near Real Time) [6][14][17].

Untuk mengamati kualitas udara di Jakarta dengan kaitannya dengan pandemi Covid dan pembatasan kegiatan masyarakat, penulis melakukan monitoring serta analisis konsentrasi emisi polutan gas karbon monoksida (CO) sebagai pemenuhan kualitas udara di DKI Jakarta, pada saat sebelum dan saat diberlakukan pembatasan kegiatan masyarakat (lockdown) pandemi Covid-19. GEE digunakan dalam mengolah Sentinel 5-P serta menampilkan visualisasi peta digital untuk memonitoring kadar ambien polutan. Spatio-temporal analysis pada penelitian ini dilakukan sebagai pendekatan dalam melakukan analisis sejumlah data time series.

II. DATA AND METHODOLOGI

A. Study Area Penelitian

Studi area penelitian adalah wilayah administrasi DKI Jakarta, Indonesia. DKI Jakarta terdiri atas Kota Administratif Jakarta Pusat, Jakarta Barat, Jakarta Timur, dan Jakarta Selatan) dengan Luas wilayah 661,5 km², serta terletak pada latitude 6°10'30.00" S, dan longitude 106°49'35.76" E.



Gambar 1. Studi Area (Provinsi DKI Jakarta)

B. Metodologi dan Pengolahan Data

Akuisisi data Kepadatan kolom CO vertical dihasilkan melalui Citra Sentinel-5P yang tersedia pada data Katalog Earth Engine. Dataset Sentinel-5P Near Real-Time Carbon Monoxide (NRTI/L3_CO), merupakan Citra Level 3 yang menangkap konsentrasi CO₂ troposfer dengan resolusi Spasial 1113.2 meter, dan rentang spektral 2,3 μm (SWIR). Selanjutnya untuk mendapatkan boundary area penelitian, dilakukan Clipping pada Citra Sentinel dengan SHP area wilayah penelitian. Untuk mengukur pola kadar CO pada masa pandemi, selanjutnya dilakukan pembagian data secara Time Series berdasarkan periode masa berlaku kebijakan pembatasan kegiatan masyarakat.

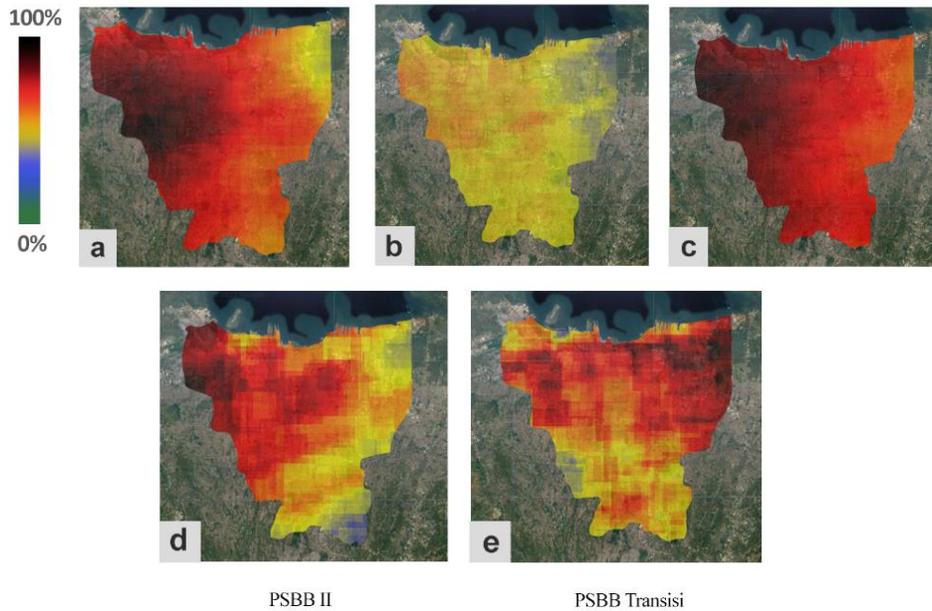
III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengukuran Konsentrasi CO ditunjukkan melalui nilai minimal, maksimal serta nilai rata-rata konsentrasi vertical Karbon Monoksida (CO) yang diakuisisi melalui band CO_column_number_density pada produk satelit Sentinel-5P Near Real-Time Carbon Monoxide (NRTI/L3_CO). Untuk memahami pola persebaran konsentrasi CO, selanjutnya data akan dibagi secara time series berdasarkan periode serta durasi hari pembatasan kegiatan masyarakat (Tabel 1). Fase Awal diambil selama rentan waktu 1 tahun sebelum terjadinya pandemi sebagai acuan nilai awal konsentrasi CO di DKI Jakarta. Selanjutnya terdapat 4 Fase pada Pembatasan Sosial Berskala Besar (PSBB) yaitu PSBB Jilid I, PSBB Transisi, PSBB Jilid II dan PSBB Transisi kedua. Pada Fase Pemberlakuan Pembatasan Kegiatan Masyarakat (PPKM), data dibagi menjadi 13 periode yang terdiri atas PPKM, PPKM Mikro, PPKM Darurat, PPKM Level 4, PPKM Level 3, PPKM Level 2 dan PPKM Level 1.

TABEL I
 HASIL PENGUKURAN KADAR CO BERDASARKAN PERIODE PEMBATAHAN KEGIATAN MASYARAKAT

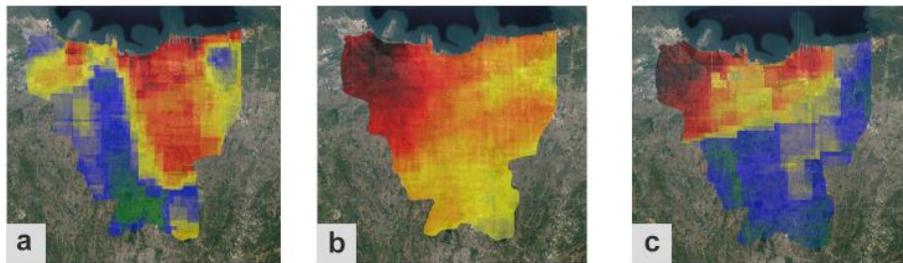
| Kategori | Tanggal Berlaku | | Durasi (hari) | Konsentrasi Vertikal CO ((mol/m ²)10 ³) | | | |
|------------------|-----------------|------------|---------------|---|-----|------|----|
| | Awal | Akhir | | Min | Max | Mean | |
| Fase Awal | 01-01-2019 | 09-04-2020 | 464 | 34 | 40 | 39 | |
| PSBB | Jilid I | 10-04-2020 | 04-06-2020 | 55 | 27 | 35 | 32 |
| | Transisi | 05-06-2020 | 10-09-2020 | 97 | 24 | 35 | 34 |
| | Jilid II | 14-09-2020 | 11-10-2021 | 27 | 31 | 40 | 37 |
| | Transisi | 12-10-2020 | 10-01-2021 | 90 | 29 | 35 | 34 |
| PPKM | PPKM | 11-01-2021 | 08-02-2021 | 28 | 28 | 33 | 31 |
| | Mikro | 09-02-2021 | 28-06-2021 | 139 | 31 | 36 | 35 |
| | Darurat | 03-07-2021 | 20-07-2021 | 17 | 28 | 34 | 31 |
| | Level 4 | 21-07-2021 | 04-10-2021 | 75 | 31 | 36 | 34 |
| | Level 3 | 05-10-2021 | 18-10-2021 | 13 | 33 | 43 | 41 |
| | Level 2 | 19-10-2021 | 01-11-2021 | 13 | 33 | 43 | 39 |
| | Level 1 | 02-11-2021 | 29-11-2021 | 27 | 25 | 36 | 31 |
| | Level 2 | 30-11-2021 | 13-12-2021 | 13 | 26 | 33 | 29 |
| | Level 1 | 14-12-2021 | 03-01-2022 | 20 | 25 | 37 | 33 |
| | Level 2 | 04-01-2022 | 07-02-2022 | 34 | 26 | 33 | 31 |
| | Level 3 | 08-02-2022 | 07-03-2022 | 27 | 26 | 32 | 30 |
| | Level 2 | 08-03-2022 | 23-05-2022 | 76 | 28 | 34 | 33 |
| | Level 1 | 24-05-2022 | 04-07-2022 | 41 | 25 | 33 | 32 |

Untuk memahami persebaran konsentrasi CO, visualisasi peta sebaran dibuat berdasarkan nilai konsentrasi CO, dimana warna hijau menggambarkan konsentrasi sangat rendah, biru menggambarkan konsentrasi rendah, kuning menggambarkan konsentrasi sedang, merah menggambarkan konsentrasi tinggi dan hitam menggambarkan konsentrasi sangat tinggi (berbahaya). (Gambar 2, 3, 4, dan 5).



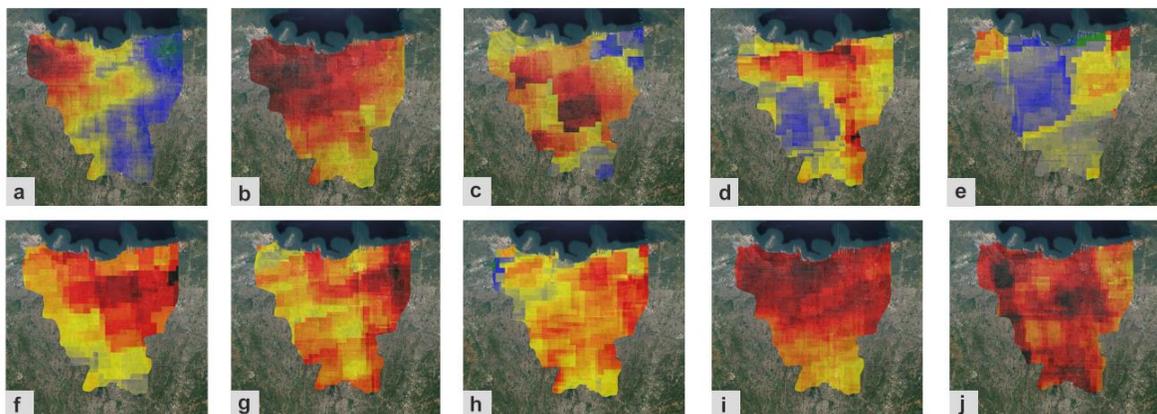
Gambar 2. a) Fase awal, b) PSBB I, c) PSBB Transisi, d) PSBB II, e) PSBB Transisi

Pada fase awal / pra pandemi (Gambar2.a) dapat diamati persebaran CO tinggi berada di wilayah Jakarta dengan dominasi nilai sedang, tinggi, dan sangat tinggi pada keseluruhan wilayah Jakarta. Kebijakan pembatasan kegiatan PSBB berlaku sejak tanggal 10-4-2020, hingga 04-06 2020. Pada periode tersebut, pembatasan kegiatan dapat dikategorikan sangat ketat pada berbagai sector termasuk kebijakan untuk WFH 100% bagi Instansi Pemerintah, Perkantoran serta Instansi Pendidikan. Pada fase penurunan emisi CO terjadi dengan signifikan (Gambar 3b) dengan mayoritas konsentrasi CO berada pada rentang nilai sedang. Selanjutnya pemerintah melonggarkan aturan PSBB dengan merubah status dari PSBB menjadi PSBB Transisi (Gambar 3c). Pada periode ini, lonjakan nilai amabang CO mengalami peningkatan yang cukup tinggi hingga mendekati fase awal sebelum pandemi. Namun demikian, periode ini berlangsung selama hampir 2 bulan dan cukup jauh berbeda jika dibandingkan rentan waktu pada masa fase awal sebelum pandemi. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap nilai rerata CO yang berada pada nilai 0.034, berbeda jauh dengan nilai rerata CO pada masa pandemi yang berada pada nilai 0.040. Pada tanggal 14-09-2020, pemerintah kembali memberlakukan PSBB Jilid II Pada periode II, penurunan kadar CO kembali terjadi, hanya pada Sebagian wilayah Jakarta (Gambar 2c), hingga pola kenaikan yang serupa kembali terjadi pada saat PSBB kembali dilonggarkan menjadi PSBB transisi (Gambar 3d).



Gambar 3. a) PPKM, b) PPKM Mikro, c) PPKM Darurat

Persebaran nilai ambien CO rendah hingga sangat rendah yang cukup tinggi dan mencapai 40% wilayah Jakarta muncul pada saat kenaikan status dari PSBB transisi menuju PPKM (3.a). Pada PPKM pertama, terdapat sebaran nilai rendah yang cukup tinggi pada wilayah Jakarta barat dan selatan. Selanjutnya pola anomaly data CO yang mirip pada periode PSBB juga terjadi pada saat penurunan status menjadi periode PPKM Mikro (3.b). Pada periode ini, konsentrasi CO juga turut naik dan kembali turun pada meningkatnya status PPM menjadi PPKM darurat dengan pola sebaran yang mendekati fase PPKM pertama (Gambar 3.c) dengan tingkat kualitas emisi yang sangat rendah hingga >50% wilayah Jakarta.



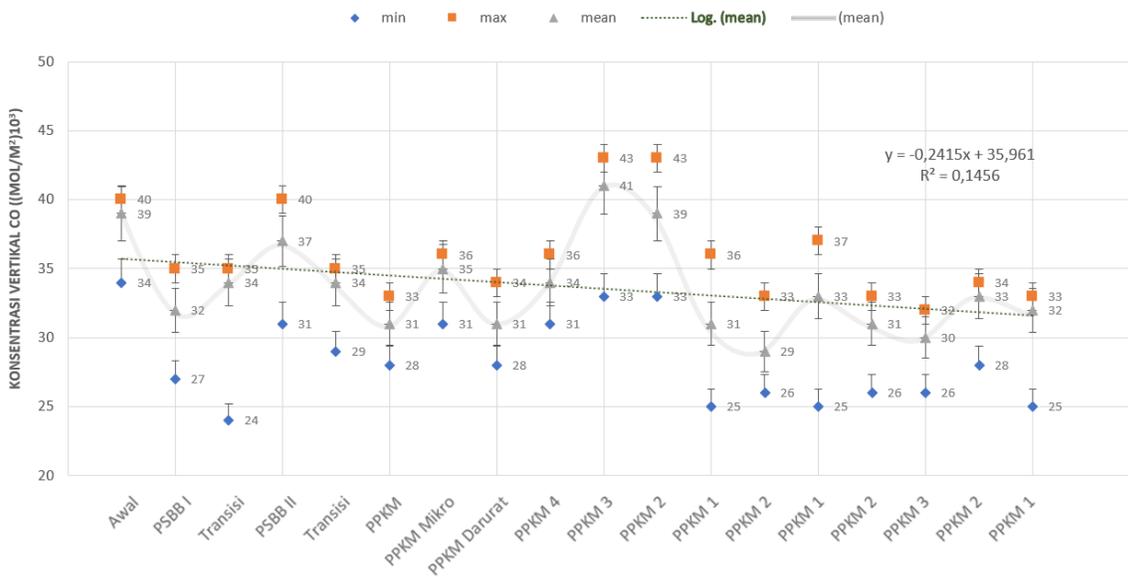
Gambar 4. PPKM: a) Level 4, b) Level 3, c) Level 2, d) Level 1, e) Level 2, f) Level 1, g) Level 2, h) Level 3, i) Level 2, j) Level 1

Pada tanggal 11-01-2021, Pemerintah mengeluarkan peraturan perubahan penamaan PPKM dari Mikro dan Darurat menjadi PPKM Level 1, 2, 3 dan 4. Dimana, semakin tinggi level PPKM, maka aturan pembatasan juga semakin diperketat. Mengingat, status perubahan status dari Darurat ke Level 4 pada hakikatnya adalah sama, pada Gambar 4.a, PPKM Level 4 memiliki kemiripan sebaran data konsentrasi CO dengan PPKM Darurat dengan presentase kadar CO yang rendah pada sebagian wilayah Jakarta.

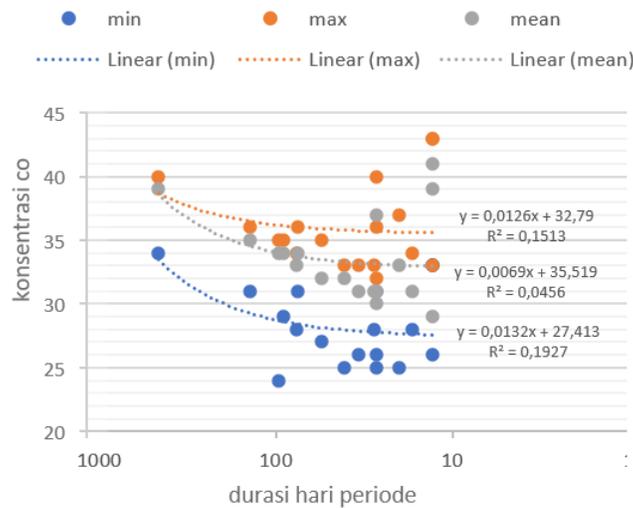
Penurunan Level terjadi dapat diamati dari Level 4 ke Level 3 (Gambar 4.b). Pada periode ini pola sebaran CO memiliki kemiripan jika dibandingkan dengan penurunan status dari PSBB ke PSBB Transisi, serta dari PPKM ke PPKM Mikro, dimana konsentrasi CO mengalami peningkatan pada saat status pembatasan kegiatan diturunkan. Namun demikian terdapat intersepsi pada nilai rerata ambien CO pada periode ini. Konsentrasi CO mencapai nilai tertinggi selama masa pandemi berlangsung pada periode ini, dengan nilai mendekati rata-rata awal CO sebelum terjadinya pandemi.

Pada periode selanjutnya, penurunan dan peningkatan status diberlakukan dan disesuaikan dengan kondisi persebaran virus Covid-19. Seiring dengan menurunnya kasus Covid di Indonesia, pemerintah melonggarkan kebijakan PPK dimana penurunan level terjadi pada periode I dan j. Dapat diamati jika penurunan dan kenaikan kadar emisi secara fluktuatif terus terjadi, dengan pola menurun hingga kembali naik pada fase akhir Level 2 dan 1 dengan nilai cukup tinggi (Gambar 4.i dan 4.j).

Meskipun nilai rerata emisi CO dan persebaran nilai secara spatial mengalami kenaikan dan penurunan, namun secara keseluruhan nilai rerata, pola grafis pada fase awal dan fase pandemi mengalami penurunan secara linier (Gambar 5). Selanjutnya, untuk melakukan Analisa terhadap adanya intersepsi sebaran data, selanjutnya dilakukan klastering data berdasarkan durasi waktu penerapan kebijakan pembatasan kegiatan masyarakat, dimana dapat diamati bahwa anomaly data muncul pada periode kebijakan yang lebih singkat. Hal tersebut dapat disebabkan oleh nilai bias emisi yang tergolong lebih variative pada periode waktu yang lebih singkat (Gambar 6)



Gambar 5. Time Series Konsentrasi CO Per Periode Pembatasan Kegiatan Masyarakat



Gambar 6. Pola Spatio-temporal emisi karbon berdasarkan durasi periode pembatasan kegiatan masyarakat

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, nilai rata-rata konsentrasi vertical CO dikumpulkan dari sebelum pandemi yaitu pada Januari 2019 hingga terjadinya pandemi yaitu pada Juni 2022. Hasil pengukuran menunjukkan adanya pola spatio temporal kandungan CO pada saat sebelum dan pandemi berlangsung yang cukup signifikan hingga 30%, memiliki trendline regresi yang searah dengan nilai koefisien regresi $y = -0,2415x + 35,961$ dan $R^2 = 0,1456$. Dalam PSBB dan PSBB transisi, anomali tingkat kepadatan karbon juga mungkin dapat dipengaruhi oleh factor eksternal lain seperti adanya hari besar yang masih banyak terjadi meskipun ada larangan untuk melakukan mobilisasi antar kota. Disamping itu faktor menurunnya kasus Covid-19, serta kejenuhan masyarakat terhadap periode pembatasan kegiatan juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran konsentrasi karbon. Untuk penelitian mendatang, penulis merekomendasikan untuk melakukan penelitian yang dapat mengukur korelasi antara gas polutan yang berbeda, serta penambahan faktor lain yang mungkin dapat mempengaruhi kualitas dan polusi udara menggunakan index citra satelit lain.

REFERENSI

- [1] Tin Ko O., Noppol A., Praeploy K., et al., 2021, Nitrogen Dioxide (NO2) Level Changes during the Control of COVID-19 Pandemic in Thailand, *Aerosol and Air Quality* Volume 21, Issue, Taiwan Association for Aerosol Research, ISSN: 1680-8584 print, ISSN: 2071-1409 online, doi.org/10.4209/aaqr.200440
- [2] G. Kaplan, Yigit Avdan, Zehra et al., 2019, Spaceborne Nitrogen Dioxide observations from the Sentinel-5P TROPOMI Over Turkey. *Proceedings*. 18. 10.3390/ECRS-3-06181.
- [3] L. Wu, & R. Wang, 2005, Carbon Monoxide: Endogenous Production, Physiological Functions, and Pharmacological Applications, *Pharmacological Reviews*, 57(4). doi.org/10.1124/pr.57.4.3
- [4] Sheffiera I., Lucky H., Dewantoro, et al., 2021, Dinamika Konsentrasi Emisi Gas Karbon Monoksida (Co) Selama Periode Psbb Menggunakan Komputasi Berbasis Cloud Pada Google Earth Engine Studi Kasus di Provinsi DKI Jakarta, Indonesia (Dynamics of Gas Emission Concentration of Monoxide (CO) during PSBB Period Using Cloud Computing Based on Google Earth Engine, Case Study of DKI Jakarta Province, Indonesia), *Majalah Ilmiah Globe*. 23. 35 - 42. 10.24895/MIG.2021.23-1.1258Onesimo M., and L. Kumar, 2019, Google Earth Engine Applications, Reprinted from: *Remote Sens*. 2019, 11, 591, doi:10.3390/rs11050591
- [5] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia, 2020, Nomor P.14/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2020 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara
- [6] V. Huijnen, H.J. Eskes, A. Poupkou, et al., 2010, Comparison of OMI NO2 tropospheric columns with an ensemble of global and European regional air quality models. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(7), 3273–3296.
- [7] Liu et al., 2009, A Remote Sensing Image Process Method of Supervised Classification under Grid Environment, *IEEE*.

-
- [8] R. Khatami, G. Mountrakis, S.V. Stehman, 2016, A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment* 177 (2016) 89–100. Elsevier. doi: 10.1016/j.rse.2016.02.028
 - [9] Hertanto S., 2017, Analisis Multivariat Performa Principal Polar Spectral Indices Pada Eo-1 Hyperion: Studi Kasus Pemetaan Lahan Padi, Magister Thesis, Universitas Brawijaya, <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/1840/>
 - [10] L. Kumar, and Onesimo M., 2018, Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential, Reprinted from: *Remote Sens.* 2018, 10, 1509, doi:10.3390/rs10101509
 - [11] Onesimo M., and L.Kumar, 2019, Google Earth Engine Applications, Reprinted from: *Remote Sens.* 2019, 11, 591, doi:10.3390/rs11050591
 - [12] Mohamed M., 2021, Monitoring the Impacts of COVID-19 pandemic on Climate Change and the Environment on Egypt Using Sentinel-5P Images, and the Carbon Footprint Methodology, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* (2021), doi: 10.1016/j.ejrs. 2021.07.003
 - [13] Shams A., Masoud G, 2022, Emissions of nitrogen dioxide in the northeast U.S. during the 2020 COVID-19 lockdown, *Journal of Environmental Management*, Volume 312, 114902, ISSN 0301-4797, doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114902.
 - [14] J. de Vries, R. Voorsa, Barend O., et.al, 2016, TROPOMI on ESA's Sentinel 5p ready for launch and use. Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016), *Proc. of SPIE Vol. 9688, 96880B*. doi: 10.1117/12.2240839
 - [15] P. Schneider, P.D. Hamer, A. Kylling, et.al., 2021, Spatiotemporal Patterns in Data Availability of the Sentinel-5P NO2 Product over Urban Areas in Norway. *Remote Sens.* 2021, 13, 2095. <https://doi.org/10.3390/rs13112095>
 - [16] J. Veeffkind, et al., 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 Sens. Environ.* 70–83.
 - [17] Van Weele, Levelt, Aben, I., et al., 2008, Science requirements document for TROPOMI, volume I. Mission and science objectives and observational requirements. KNMI.