

ANALISIS SPASIO-TEMPORAL PENGARUH CURAH HUJAN TERHADAP POLUSI UDARA KARBON MONOKSIDA DI KOTA BANDUNG TAHUN 2023: PENDEKATAN BERBASIS DATA SATELIT

EKA RAMADHAN^{1*}, FIRMAN HADI¹, MUHAMMAD ADNAN YUSUF¹

1. Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto, SH. Tembalang, Semarang Telp.(024)76480785, 76480788
Email : eka.ramadhan1602@gmail.com

ABSTRAK

Karbon Monoksida (CO) termasuk ke dalam *primary pollutants* yang paling banyak menyebabkan masalah pencemaran udara sebesar 58%. Sumber utama CO adalah emisi kendaraan bermotor. Jumlah kendaraan bermotor di Kota Bandung hampir setara dengan jumlah penduduknya, yaitu mencapai 2,2 juta unit, sedangkan penduduknya berjumlah 2,4 juta jiwa. Selain itu, tahun 2023 menjadi periode dengan jumlah kejadian kebakaran terbanyak (352 kejadian). Oleh karena itu, analisis spasio-temporal polusi udara CO penting dilakukan untuk monitoring pencemaran udara. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis distribusi spasial dan temporal konsentrasi CO serta pengaruh curah hujan terhadap konsentrasi CO di Kota Bandung tahun 2023 dengan menggunakan metode penginderaan jauh. Hasil penelitian menunjukkan akumulasi CO tertinggi dan terendah berada di Kecamatan Bandung Kidul dan Cidadap ($880,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $827,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Selain itu, akumulasi CO tertinggi terjadi selama periode bulan kering (curah hujan $<100 \text{ mm}$). Analisis korelasi dan regresi menunjukkan pada periode bulan kering terdapat korelasi positif yang kuat ($r=0,56$) serta pengaruh curah hujan yang lebih besar ($R^2 = 0,36$) terhadap konsentrasi CO dibandingkan periode bulan lainnya. Temuan penelitian ini menunjukkan perlu dilakukan pemantauan kualitas udara di Kota Bandung pada bulan kering agar dapat menekan peningkatan karbon monoksida.

Kata kunci: curah hujan, karbon monoksida, penginderaan jauh, polusi udara.

ABSTRACT

Carbon Monoxide (CO) is among the *primary pollutants* contributing significantly to air pollution issues, accounting for 58%. The main source of CO is emissions from motor vehicles. The number of motor vehicles in Bandung City is nearly equivalent to its population, reaching 2.2 million units, while the population stands at 2.4 million people. Additionally, the year 2023 recorded the highest number of fire incidents (352 occurrences). Therefore, a spatio-temporal analysis of CO air pollution is essential for monitoring air quality. The objective of this research is to analyze the spatial and temporal distribution of CO concentrations and the influence of rainfall on CO levels in Bandung City 2023 using remote sensing methods. The research results indicate that the highest and lowest CO accumulation occurs in the Bandung Kidul and Cidadap districts ($880.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $827.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Furthermore, the highest CO accumulation is observed during dry periods (rainfall $<100 \text{ mm}$). Correlation and regression analyses reveal a strong positive correlation ($r=0.56$) and a greater influence of rainfall ($R^2=0.36$) on CO concentrations during dry months compared to other periods. These findings indicate the need for air quality monitoring in Bandung City during dry months to mitigate the increase in CO levels.

Keywords: air pollution, carbon monoxide, precipitation, remote sensing,.

1. PENDAHULUAN

World Health Organization (WHO) menyatakan bahwa pencemaran udara telah menjadi isu lingkungan global, menyebabkan tujuh juta kematian setiap tahunnya, baik di dalam maupun di luar ruangan. Dampak dari polusi udara mencakup 25% kematian karena penyakit jantung, 24% stroke, 43% penyakit paru-paru obstruktif, dan 29% kanker paru-paru (Khairina, 2019). Gas-gas pencemar udara yang memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia adalah Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO), Belerang Oksida (SO), Hidrokarbon (HC), partikel (*particulate*), dan gas rumah kaca. Berdasarkan sumbernya, Gas pencemar udara dikelompokkan menjadi dua, yaitu *primary* dan *secondary pollutants*. *Primary pollutants* merujuk pada polusi udara yang tercemar langsung terhadap lingkungan. *Secondary pollutants* merujuk pada gas pencemar udara yang berasal dari reaksi antara *primary pollutants* dan partikel pada atmosfer. Gas *primary pollutants* yang menjadi penyumbang terbesar polusi udara adalah CO (58%) (Anoka-Ramsey Community College, 2024).

Gas CO adalah gas yang memiliki sifat fisik tidak berwarna dan tidak berbau yang dapat menimbulkan bahaya. Penyumbang terbesar dari gas CO adalah kendaraan bermotor. Dalam kurun waktu tiga tahun, jumlah kendaraan bermotor di Indonesia mengalami peningkatan signifikan (BPS, 2023). Kota Bandung menjadi salah satu kota dengan jumlah kendaraan bermotor terbanyak tahun 2023. Berdasarkan data Dinas Perhubungan (Dishub) Kota Bandung, jumlah kendaraan bermotor hampir setara dengan jumlah penduduknya, yaitu mencapai 2,2 juta unit, sedangkan penduduknya berjumlah 2,4 juta jiwa. Hal tersebut menyebabkan jalanan di Kota Bandung mengalami kemacetan sehingga gas hasil pembakaran terkonsentrasi di beberapa wilayah di Kota Bandung. Studi yang dilakukan oleh (Pangerapan, Sumampouw, dan Joseph, 2019) menunjukkan bahwa jalan dengan intensitas kendaraan yang tinggi cenderung memiliki kadar CO yang lebih banyak. Hal tersebut berbanding terbalik dengan jalan yang kendaraannya berintensitas rendah. Penelitian yang dilakukan (Sasmita, Reza, Elystia, dan Adriana, 2022) menjelaskan bahwa peningkatan jumlah kendaraan berbanding lurus dengan peningkatan konsentrasi CO.

Peristiwa kebakaran yang terjadi di Kota Bandung pada tahun 2023 menjadi faktor penyumbang meningkatnya gas CO. Data dari Bidang Pemadaman dan Penyelamatan Diskar PB Kota Bandung, pada tahun 2023 telah terjadi kebakaran dengan jumlah kebakaran terbanyak, yaitu 352 kejadian. Kondisi kemarau turut menjadi faktor potensi meningkatnya angka tersebut. Curah hujan berperan penting dalam mengurangi konsentrasi CO di atmosfer melalui mekanisme alami seperti pencucian udara (*washout*), air hujan dapat menangkap polutan seperti CO dan mengendapkannya ke tanah. Curah hujan yang tinggi membantu menurunkan konsentrasi CO, sedangkan pada musim kemarau yang minim hujan, CO cenderung terakumulasi karena kurangnya mekanisme pembersihan (Syafura, Rohmawati, dan Turyanti, 2023).

Global Precipitation Measurement Integrated Multi-satellitE Retrievals (GPM IMERG) merupakan produk penginderaan jauh yang memiliki misi utama untuk menyediakan data curah hujan global. Satelit ini merupakan proyek kerja sama antara *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dan *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). GPM IMERG memiliki spesifikasi resolusi spasial 11 km² dan resolusi temporal 30 menit. Keterbatasan jumlah Stasiun Pemantau Kualitas Udara Ambiens (SPKUA) menjadi tantangan tersendiri dalam upaya untuk monitoring kualitas udara. Oleh karena itu, perlu adanya alternatif lain untuk monitoring kualitas udara, salah satu contohnya adalah pendekatan dengan metode penginderaan jauh. Produk penginderaan jauh yang dapat digunakan untuk monitoring kualitas udara parameter CO adalah citra satelit Sentinel-5P. Satelit tersebut memiliki spesifikasi

resolusi spasial 1 km² dan resolusi temporal harian (Savenets, 2021). Pemanfaatan teknologi berbasis *cloud computing* menggunakan *Google Earth Engine* dapat digunakan sebagai alat untuk mengolah data citra satelit Sentinel-5P (Cakmak, Yilmaz, dan Sanli, 2023). Hasil pengolahan data Sentinel-5P tersebut selanjutnya dilakukan verifikasi dengan data SPKUA untuk mengevaluasi performa datanya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk monitoring kualitas udara parameter CO serta menganalisis pengaruh variabel curah hujan terhadap gas CO di Kota Bandung pada tahun 2023 dengan metode penginderaan jauh berbasis citra satelit. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan wawasan terkait pemanfaatan data citra satelit sebagai alternatif karena keterbatasan SPKUA di Indonesia sehingga penekanan polusi udara dapat tercapai serta memberikan wawasan terkait analisis pengaruh variabel curah hujan terhadap konsentrasi CO.

2. METODE

2.1 Wilayah Studi

Wilayah studi penelitian ini berada di Kota Bandung. Wilayah Kota Bandung terdiri atas 30 kecamatan dan 151 kelurahan. Secara astronomis Kota Bandung terletak pada 107°36' BT dan 6°55' LS dan berada pada ketinggian 700 mdpl dengan luas wilayah 16.729,65 Ha. Posisi Kota Bandung terletak di bagian tengah "Cekungan Bandung" dengan luas dimensinya 233,000 Ha.

2.2 Data

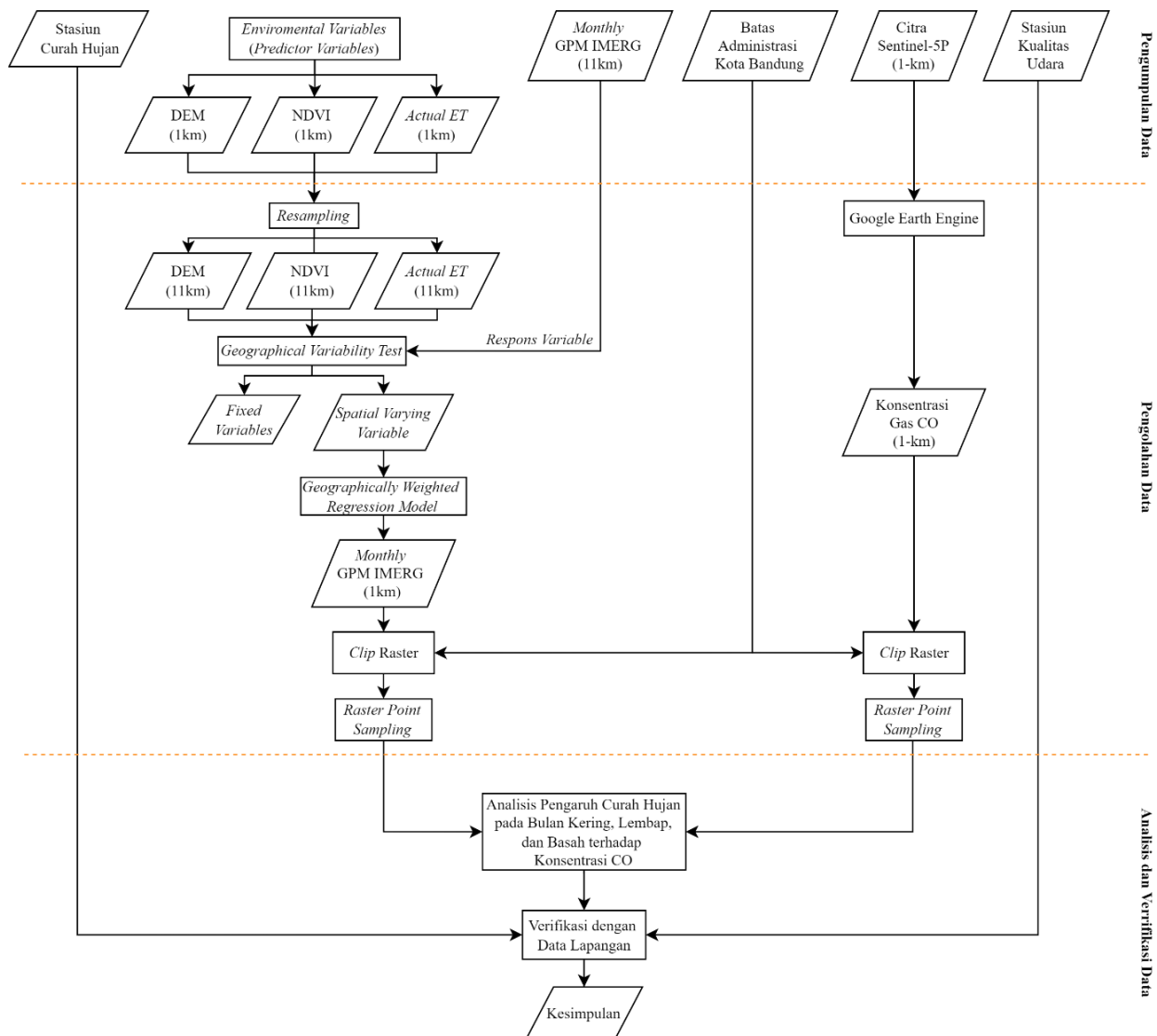
Data yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas data spasial dan tabular. Rincian dan sumber data tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Sumber Data

Data	Sumber
Batas Administrasi Kota Bandung	Badan Informasi Geospasial (Indonesia Geospatial Portal)
Sentinel-5P	ESA Copernicus (scihub.copernicus.eu)
GPM IMERG	NASA (https://giovanni.gsfc.nasa.gov/)
NDVI MODIS <i>Terra L3 Monthly</i>	USGS (https://lpdaac.usgs.gov/)
DEM GTOPO	USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/)
Evapotranspirasi	USGS (https://earlywarning.usgs.gov/)
Data Pengukuran CO SPKUA	Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan (DLHK)
Data Stasiun Curah Hujan	BMKG diakses melalui Badan Pusat Statistik

2.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah eksploratori dengan analisis kualitatif-kuantitatif. Tahapan penelitian ini secara garis besar terbagi menjadi tiga tahapan, yaitu pengumpulan, pengolahan, serta analisis dan verifikasi data. Secara lebih detil tahapan penelitian ini dijelaskan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.4 Downscaling GPM IMERG

Konsep *downscaling* dalam ruang lingkup penginderaan jauh merujuk pada penajaman resolusi spasial. Proses pengolahan ini terdiri atas penentuan metode *downscaling*, pemilihan variabel lingkungan dan penentuan variabel lingkungan sesuai dengan metode *downscaling* (Arshad, dkk., 2021). Metode *downscaling* yang digunakan pada data curah hujan GPM IMERG adalah *Geographically Weighted Regression* (GWR). Metode tersebut dipilih karena kemampuannya dalam memberikan model taksiran parameter yang bersifat lokal dan mampu menganalisis heterogenitas data spasial curah hujan (Chen, Liu, Liu, dan Li, 2014).

Data curah hujan GPM IMERG dengan resolusi spasial 11 km² perlu dilakukan pengolahan penajaman citra (*downscaling*) pada aplikasi R Studio agar menghasilkan citra dengan resolusi spasial 1 km². Hal tersebut dilakukan dengan pertimbangan kesesuaian resolusi spasial dengan Sentinel-5P dan ketelitian data yang lebih tinggi. Proses *downscaling* citra curah hujan dilakukan dengan menambahkan variabel lingkungan sebagai pembentuk model *downscaling*. Hasil *downscaling* data curah hujan tersebut kemudian dikelompokkan berdasarkan klasifikasi Oldeman untuk mengidentifikasi bulan kering, lembap, dan basah di Kota Bandung tahun 2023. Adapun klasifikasi iklim data curah hujan oleh Oldeman dijelaskan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Klasifikasi Curah Hujan Oldeman

Curah Hujan (mm/bulan)	Kelas
<100	Bulan Kering
100 – 200	Bulan Lembap
>200	Bulan Basah

Sumber: (Bayong, 2004) dalam (Sasminto, Tunggul dan Rahadi W, 2014)

2.5 Polusi Udara Karbon Monoksida (CO) Sentinel-5P

Konsentrasi CO di Kota Bandung pada tahun 2023 didapatkan dari pengolahan data Sentinel-5P. Sentinel-5P merupakan proyek kerja sama antara ESA, *European Commission, the Netherlands Space Office, Industry, dan data users dan scientist*. Satelit ini membawa instrumen *TROPOspheric Monitoring (TROPOMI)*. Misi utama dari Satelit Sentinel-5P adalah mengukur gas pada lapisan troposfer dengan resolusi spasial 1 km dan resolusi temporal 1-hari, membantu monitoring kualitas udara, ozon dan radiasi UV, serta perubahan iklim (Rarasati dan Afgatiani, 2020).

Pengolahan polusi udara CO dilakukan pada platform *cloud computing Google Earth Engine*. Platform ini memiliki kemampuan dalam pemrosesan *big data* penginderaan jauh secara *online*. *Dataset* citra satelit Sentinel-5P pada *Google Earth Engine* mengukur konsentrasi CO dengan satuan mol/m^2 . Nilai tersebut perlu dilakukan konversi menjadi satuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$ agar sesuai dengan standar satuan polusi udara gas CO di Indonesia. Konversi satuan mol/m^2 menjadi $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (1):

$$\text{Konsentrasi Polusi } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{\text{Jumlah mol } \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2}\right) \times \text{Berat Molekul } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) \times 10^6}{\text{Kolom Udara } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}\right)} \quad (1)$$

2.6 Analisis dan Verifikasi Data

Tahapan analisis data yang dilakukan adalah analisis *time-series* pengaruh variabel curah hujan terhadap polusi udara gas CO di Kota Bandung tahun 2023. Selain itu, dilakukan uji akurasi model *downscaling* terhadap data orisinal GPM IMERG. Uji akurasi tersebut dilakukan untuk mengevaluasi model *downscaling* yang dihasilkan (Zhu, Liu, Zhou, dan Cui, 2023). Verifikasi data terdiri atas dua tahapan, yaitu verifikasi data *downscaled* GPM IMERG dan verifikasi data penginderaan jauh terhadap data lapangan.

Verifikasi data *downscaled* curah hujan GPM IMERG dilakukan dengan membandingkan terhadap data curah hujan GPM IMERG sebelum dilakukan *downscaling* (Zhang, Su, Li, dan Li, 2023). Verifikasi model *downscaling* menggunakan parameter *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, *BIAS*, dan koefisien determinasi (R^2) (Wang, Yu, Zhu, Wang, dan He, 2021). Sedangkan, tahap verifikasi data penginderaan jauh (*downscaled* GPM IMERG dan Sentinel-5P) dilakukan dengan membandingkan terhadap data lapangan (stasiun curah hujan dan SPKUA). Adapun parameter verifikasi yang digunakan adalah RMSE, R^2 dan Bland-Altman Plot (Ferrara, Chianucci, dan Bajocco, 2023).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Curah Hujan *Downscaled* GPM IMERG

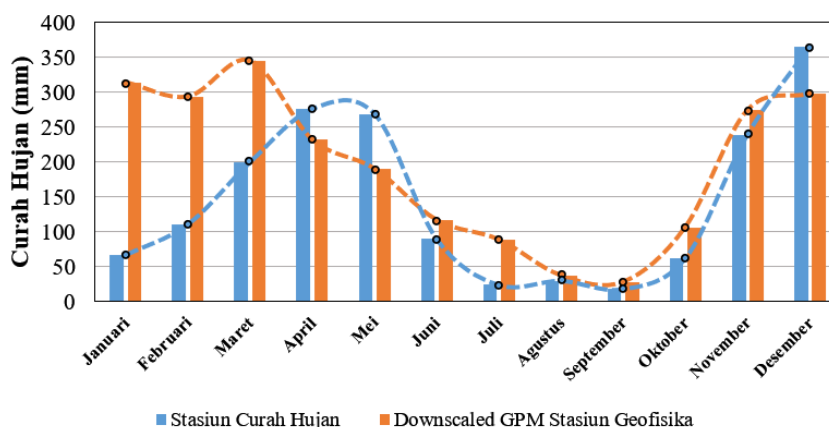
Data stasiun curah hujan menunjukkan bahwa pada periode tahun 2023, telah terjadi curah hujan dengan rata – rata curah hujan 145,92 mm. Terdapat perbedaan nilai curah hujan dari data *downscaled* GPM IMERG, data hasil pengolahan *downscaling* menunjukkan bahwa pada tahun 2023 di Kota Bandung terjadi curah hujan dengan rata – rata curah hujan 193,09 mm.

Informasi perbandingan nilai dan tren kedua data curah hujan tersebut dijelaskan secara lebih rinci pada **Tabel 3** dan **Gambar 2**.

Tabel 3. Perbandingan Data Stasiun Curah Hujan dan *Downscaled* GPM IMERG
Curah Hujan Rata – Rata (mm)

Bulan	Stasiun Curah Hujan	Kelas	<i>Downscaled</i> GPM IMERG	Kelas
1	67,00	Kering	316,11	
2	111,00		300,41	Basah
3	200,00	Lembap	344,32	
4	276,00		235,48	Basah
5	269,00	Basah	186,14	
6	90,00		116,94	Lembap
7	24,00		87,52	
8	30,00	Kering	36,42	Kering
9	18,00		26,20	
10	62,00		103,27	Lembap
11	239,00		268,30	Basah
12	365,00	Basah	295,94	Basah
Rata – Rata	145,92		193,09	

Hasil klasifikasi iklim Oldeman berdasarkan **Tabel 3**, menunjukkan terdapat persamaan antara kedua data tersebut, yaitu terdapat tiga iklim, bulan kering, lembap, dan basah. Akan tetapi, stasiun curah hujan pada tahun 2023 menjelaskan bahwa bulan kering terjadi pada bulan Januari dan Juni – Oktober, bulan lembap terjadi pada bulan Februari dan Maret, serta bulan basah terjadi pada bulan April – Mei dan November – Desember.



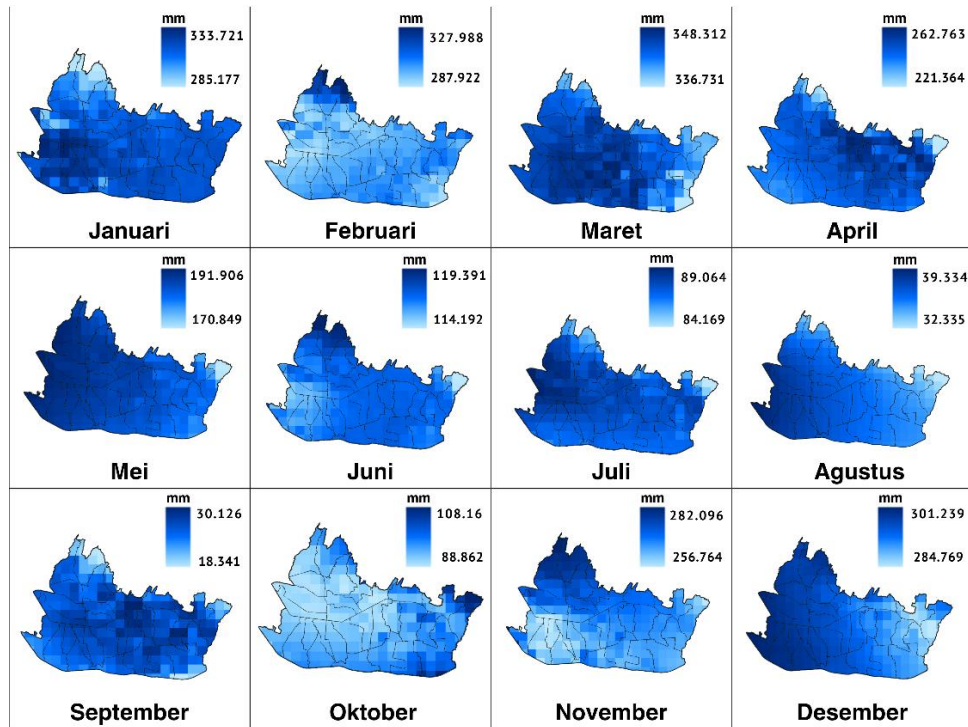
Gambar 2. Tren Perbandingan Curah Hujan Stasiun BMKG dan *Downscaled* GPM IMERG

Data curah hujan hasil pengolahan *downscaling* menjelaskan bahwa pada tahun 2023 bulan kering terjadi pada Juli – September, bulan lembap terjadi pada Mei – Juni dan Oktober, serta bulan basah terjadi pada Januari – April dan November – Desember. Persebaran curah hujan *downscaled* GPM IMERG di Kota Bandung tahun 2023 secara *time-series* dijelaskan pada **Gambar 3**.

3.2 Uji Akurasi *Downscaled* GPM IMERG dengan Orisinal GPM IMERG

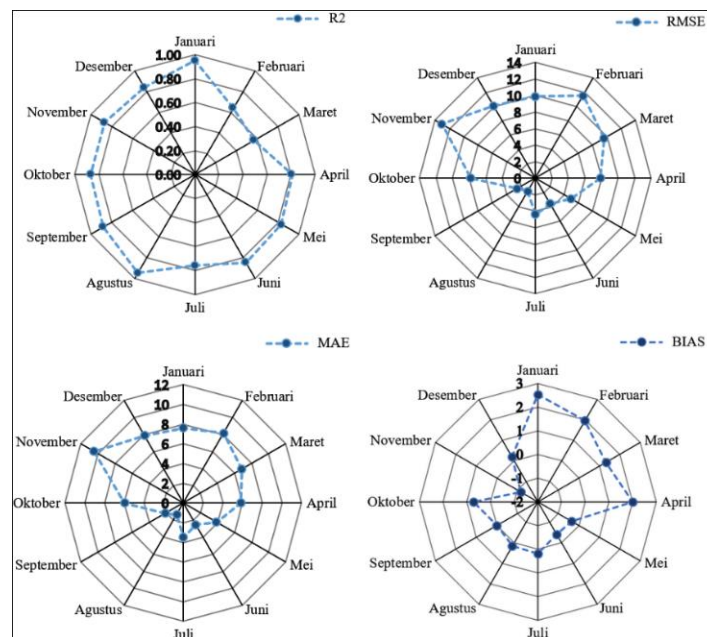
Hasil uji akurasi *downscaling* bulan Januari – Desember memiliki rata-rata nilai RMSE sebesar 7,26 mm. Model pada bulan November memiliki nilai RMSE tertinggi sebesar 13,09 mm, sedangkan model pada bulan Agustus memiliki RMSE terendah sebesar 1,85 mm. Akurasi berdasarkan MAE, rata-rata kesalahan absolut dari model *downscaling* pada periode yang sama tercatat sebesar 5,51 mm.

Analisis Spasio-Temporal Pengaruh Curah Hujan Terhadap Polusi Udara Karbon Monoksida Di Kota Bandung Tahun 2023: Pendekatan Berbasis Data Satelit



Gambar 3. Curah Hujan *Downscaled* GPM IMERG Kota Bandung Tahun 2023

Selain itu, parameter BIAS mengukur perbedaan antara nilai prediksi dan observasi, dengan rata-rata nilai BIAS seluruh model sebesar 0,60 mm yang menunjukkan kecenderungan *overestimate*. Nilai BIAS tertinggi tercatat di bulan Januari sebesar 2,52 mm, sementara nilai terendah berada di bulan November dengan -1,16 mm. Dalam hal koefisien determinasi (R^2), rata-rata model memiliki nilai 0,82, menunjukkan bahwa sebaran data mendekati garis regresi linier. Koefisien determinasi terendah berada di bulan Maret dengan R^2 sebesar 0,57, sedangkan tertinggi berada di bulan Januari dan Agustus. Perbandingan lebih lanjut tentang nilai RMSE, MAE, BIAS, dan R^2 dari setiap model *downscaling* dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Perbandingan Nilai Matriks Kesalahan Reka Lingkungan – 275

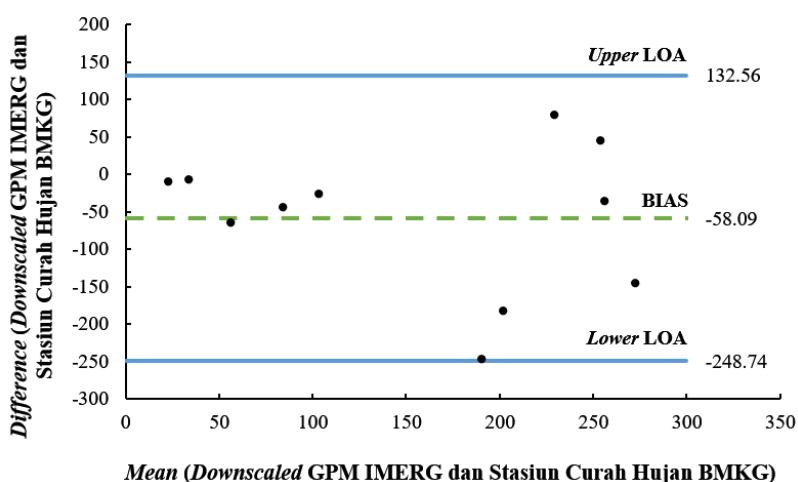
3.3 Verifikasi *Downscaled* GPM IMERG dengan Stasiun Curah Hujan

Hasil analisis regresi linier antara variabel data stasiun curah hujan BMKG (Y) dan variabel *downscaled* GPM IMERG (X) memiliki persamaan $Y = 0,657x + 18,732$. Nilai koefisien korelasi (r) menunjukkan sebesar 0,63 yang berarti terdapat hubungan korelasi yang kuat, sedangkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,40. Nilai koefisien determinasi tersebut termasuk ke dalam kelas koefisien determinasi sedang. Nilai tersebut menjelaskan bahwa terdapat kesesuaian sebesar 40% antara curah hujan *downscaled* GPM IMERG terhadap pengukuran stasiun curah hujan BMKG. Selain itu, matriks kesalahan RMSE sebesar 87,7 mm. **Tabel 4** menjelaskan *model fit measures* antara curah hujan *downscaled* GPM IMERG terhadap stasiun curah hujan BMKG.

Tabel 4. Model Fit Measures Downscaled GPM IMERG dan Stasiun Curah Hujan BMKG

Model	Intercept	Downscaled GPM IMERG	r	R ²	RMSE	Overall Model Test			
						F	df1	df2	p
1	18,732	0,657	0,63	0,40	87,7	6,68	1	10	0,027

Analisis Bland-Altman Plot dilakukan untuk mengevaluasi kesepakatan antara dua data pengukuran dengan metode yang berbeda. Hasil analisis Bland-Altman Plot dijelaskan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Bland-Altman Plot Data Curah Hujan

Hasil kedua metode pengukuran memiliki rata – rata bias sebesar -58,09. Nilai tersebut menjelaskan bahwa satu metode secara rata – rata cenderung memberikan hasil yang lebih rendah dibandingkan metode lain sebesar 58,09. Batas kesepakatan atas dan bawah menggunakan taraf signifikansi 5%, kedua nilai tersebut sebesar 132,56 dan -248,74. Bland-Altman plot menunjukkan bahwa tidak terdapat dan memiliki kesepakatan yang sangat baik. Selanjutnya, analisis uji statistik Bland-Altman menunjukkan tidak terdapat bias yang signifikan antara kedua metode pengukuran. Hasil uji statistik Bland-Altman dijelaskan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Statistik Bland-Altman Curah Hujan

	Uji t	df	p-value
Bland-Altman	-0,77	11	0,5

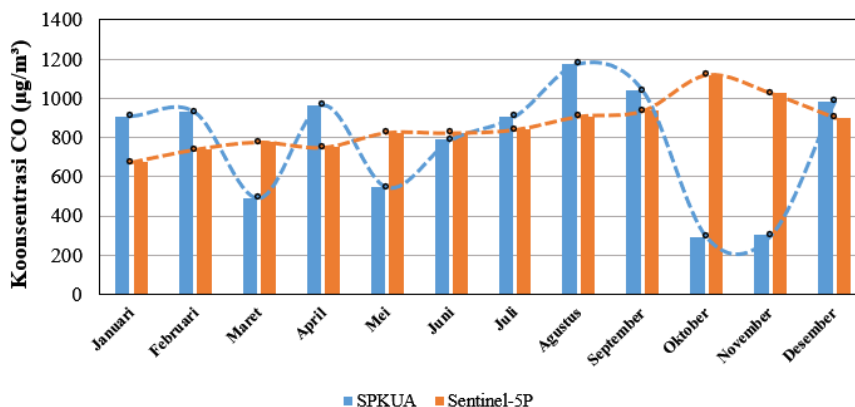
3.4 Polusi Udara Karbon Monoksida (CO) Sentinel-5P

Data SPKUA dari Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan (DLHK) menunjukkan bahwa pada periode tahun 2023, konsentrasi rata – rata kualitas udara parameter CO sebesar 777,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabel 6. Perbandingan Kualitas Udara Parameter CO

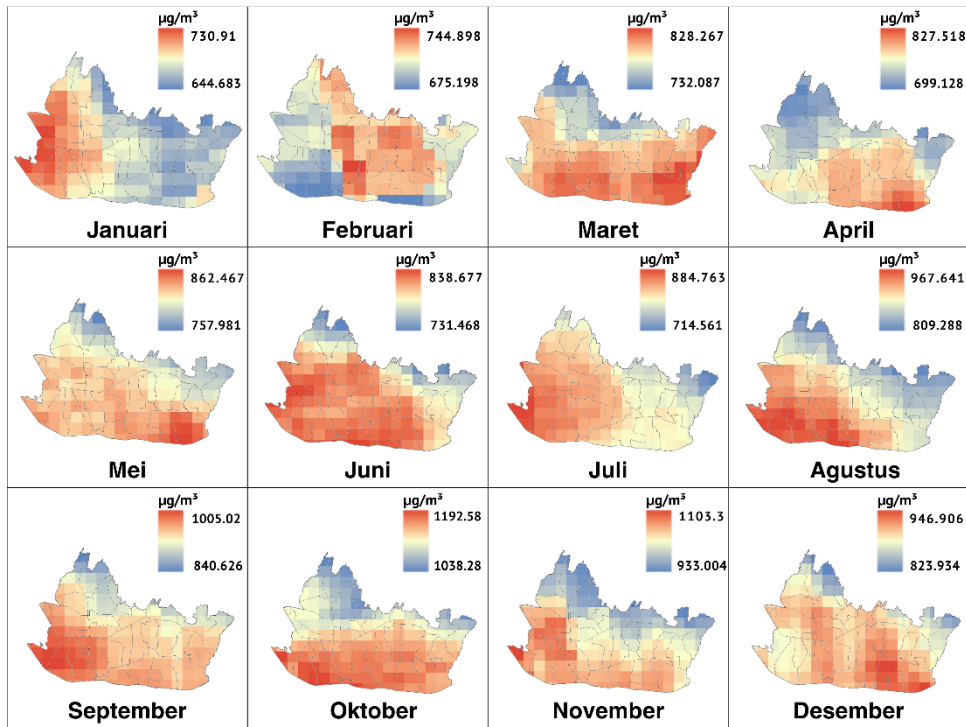
Bulan	Kualitas Udara Parameter CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	SPKUA	Sentinel-5P
1	909,54	684,48
2	930,01	711,40
3	491,70	789,66
4	965,80	763,42
5	546,59	819,24
6	788,10	807,17
7	907,73	817,74
8	1177,29	902,29
9	1038,85	954,53
10	291,28	1132,83
11	301,15	1037,46
12	985,35	905,66
Rata – Rata	777,78	860,49

Terdapat perbedaan nilai rata – rata kualitas udara parameter CO dari data Sentinel-5P, data pengukuran satelit Sentinel-5P menunjukkan bahwa rata – rata kualitas udara parameter CO di Kota Bandung pada tahun 2023 sebesar 860,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Informasi perbandingan nilai dan tren kedua data kualitas udara parameter CO tersebut dijelaskan secara lebih rinci pada **Tabel 6** dan **Gambar 6**.



Gambar 6. Tren Perbandingan Kualitas Udara Parameter CO Sentinel-5P dan SPKUA

Persebaran polusi udara gas CO di Kota Bandung pada tahun 2023 didapatkan dari hasil pengolahan pada platform *cloud computing Google Earth Engine*. Hasil pengolahan tersebut dapat menjelaskan bagaimana persebaran konsentrasi CO pada sepanjang tahun 2023. Persebaran polusi udara CO tersebut dijelaskan pada **Gambar 7**. Secara keseluruhan, persebaran konsentrasi CO di Kota Bandung sangat bervariasi. Hasil persebaran konsentrasi CO secara spasial menunjukkan bahwa Kecamatan Bandung Kidul menjadi daerah dengan konsentrasi CO tertinggi (880,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sepanjang periode tahun 2023, sedangkan kecamatan dengan konsentrasi CO terendah berada di Kecamatan Cidadap (827,04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



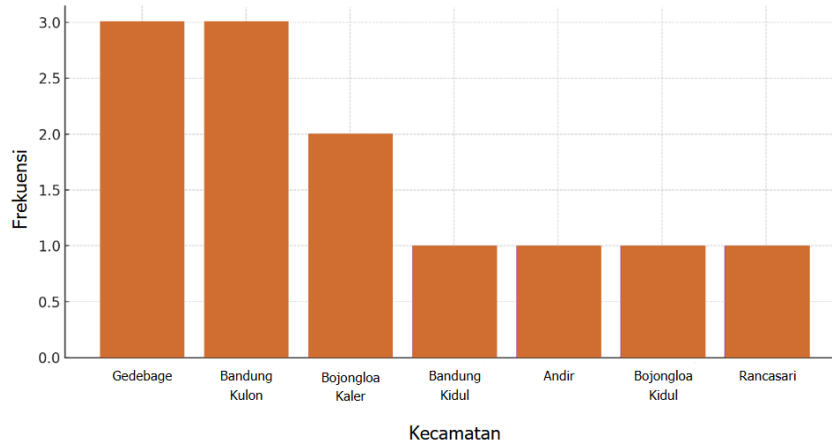
Gambar 7. Polusi Udara Gas Karbon Monoksida (CO) di Kota Bandung Tahun 2023

Analisis multitemporal dilakukan untuk mengetahui pola persebaran konsentrasi CO. Pola persebaran konsentrasi CO dilakukan dengan mengidentifikasi kecamatan yang memiliki nilai konsentrasi CO tertinggi dan terendah menurut bulan pada tahun 2023 di Kota Bandung. Persebaran konsentrasi CO multitemporal tertinggi dan terendah dijelaskan pada **Tabel 7**.

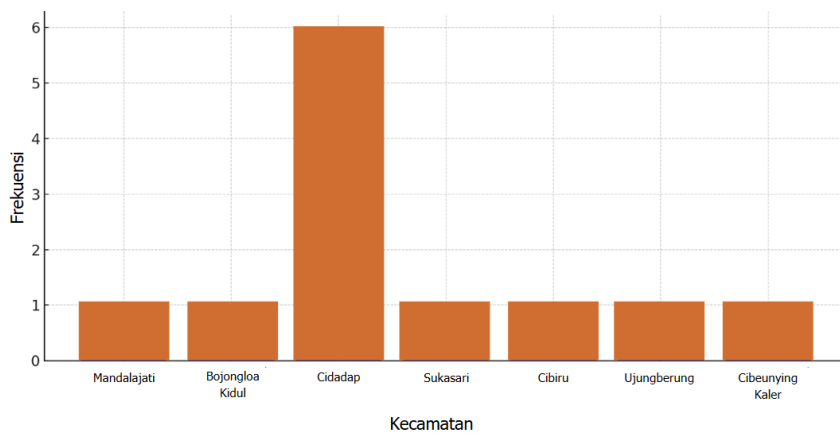
Tabel 7. Kecamatan dengan Konsentrasi CO Tertinggi dan Terendah Konsentrasi CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Bulan	Tertinggi	Kecamatan	Terendah	Kecamatan
Januari	719,67	Bandung Kulon	656,68	Mandalajati
Februari	734,24	Bandung Kidul	680,13	Bojongloa Kidul
Maret	814,73		750,59	Cidadap
April	807,70	Gedebage	715,53	Sukasari
Mei	853,59		781,86	Cidadap
Juni	828,10	Andir	763,96	
Juli	874,56	Bandung Kulon	746,07	Cibiru
Agustus	955,73	Bojongloa Kaler	841,70	Ujungberung
September	998,42	Bandung Kulon	903,47	Cidadap
Oktober	1169,50	Bojongloa Kidul	1076,06	Cibeunying Kaler
November	1076,10	Bojongloa Kaler	988,85	
Desember	938,90	Rancasari	868,86	Cidadap

Berdasarkan **Tabel 7**, terdapat wilayah di Kota Bandung dengan konsentrasi CO tertinggi dan terendah selama tahun 2023. Wilayah dengan konsentrasi CO tertinggi, seperti dijelaskan pada **Gambar 8** adalah Kecamatan Gedebage dan Bandung Kulon. Kecamatan Gedebage mencatat konsentrasi CO tertinggi selama tiga bulan berturut-turut, yakni Maret hingga Mei, sedangkan Kecamatan Bandung Kulon mencatat nilai tertinggi pada Januari, Juli, dan September. Kedua kecamatan tersebut memiliki nilai konsentrasi CO tertinggi pada rentang 719,67 – 998,42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Selain itu, pada kurun waktu tahun 2023 terdapat wilayah dengan frekuensi konsentrasi CO terendah. Wilayah dengan frekuensi konsentrasi CO terendah dijelaskan pada **Gambar 9**.



Gambar 8. Frekuensi Kecamatan dengan Konsentrasi CO Tertinggi



Gambar 9. Frekuensi Kecamatan dengan Konsentrasi CO Terendah

Berdasarkan **Gambar 9**, wilayah dengan frekuensi konsentrasi CO terendah di Kota Bandung adalah Kecamatan Cidadap. Kecamatan Cidadap selama kurun waktu tahun 2023 menjadi kecamatan dengan konsentrasi CO terendah sebanyak enam kali. Nilai konsentrasi CO terendah di Kecamatan Cidadap berada pada rentang 750,59 – 988,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

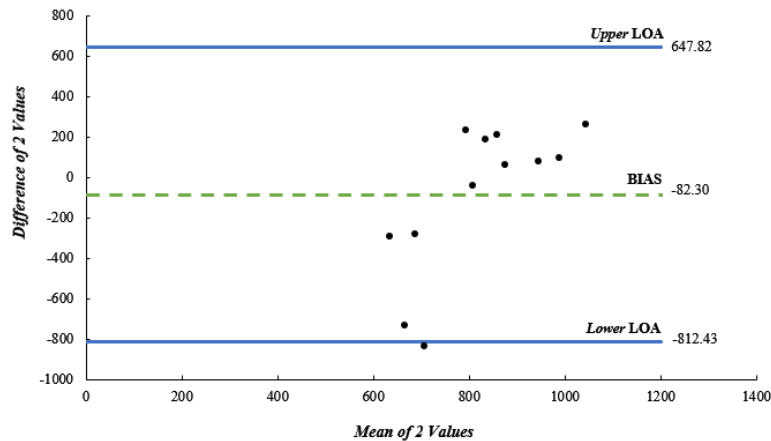
3.5 Verifikasi Polusi Udara Karbon Monoksida (CO) Sentinel-5P dengan SPKUA

Hasil analisis regresi linier antara variabel data SPKUA (Y) dan variabel Sentinel-5P (X) memiliki persamaan $Y = -1,82x + 18,90$. Nilai koefisien korelasi (r) menunjukkan sebesar 0,54 yang berarti terdapat hubungan korelasi yang sedang, sedangkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,30. Nilai koefisien determinasi tersebut termasuk ke dalam kelas koefisien determinasi sedang. Nilai tersebut menjelaskan bahwa terdapat kesesuaian sebesar 30% antara pengukuran CO Sentinel-5P terhadap pengukuran CO oleh SPKUA. Selain itu, matriks kesalahan RMSE sebesar 250 mm. **Tabel 7** menjelaskan *model fit measures* antara kualitas udara parameter CO Sentinel-5P terhadap SPKUA.

Tabel 7. Model Fit Measures Kualitas Udara Parameter CO Sentinel-5P terhadap SPKUA

Model	Intercept	Sentinel-5P	r	R^2	RMSE	Overall Model Test			
						F	df1	df2	p
1	18,90	-1,82	0,54	0,30	250	4,30	1	10	0,006

Analisis Bland-Altman Plot dilakukan untuk mengevaluasi kesepakatan antara pengukuran data Sentinel-5P dan SPKUA. Hasil analisis Bland-Altman Plot dijelaskan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Bland-Altman Plot Data Kualitas Udara Parameter CO

Kedua metode pengukuran memiliki rata – rata bias sebesar -82,30. Nilai tersebut menjelaskan bahwa satu metode secara rata – rata cenderung memberikan hasil yang lebih rendah dibandingkan metode lain sebesar 82,30. Terdapat data *outlier* yang berada di bawah *lower* LOA, data tersebut bernilai -828,92. Akan tetapi, sebagian besar data masih dalam batas kesepakatan. Hasil uji statistik Bland-Altman pada **Tabel 8** menunjukkan bahwa tidak terdapat bias yang signifikan.

Tabel 8. Statistik Bland-Altman Kualitas Udara Parameter CO

	Uji t	df	p-value
Bland-Altman	-0,77	11	0,5

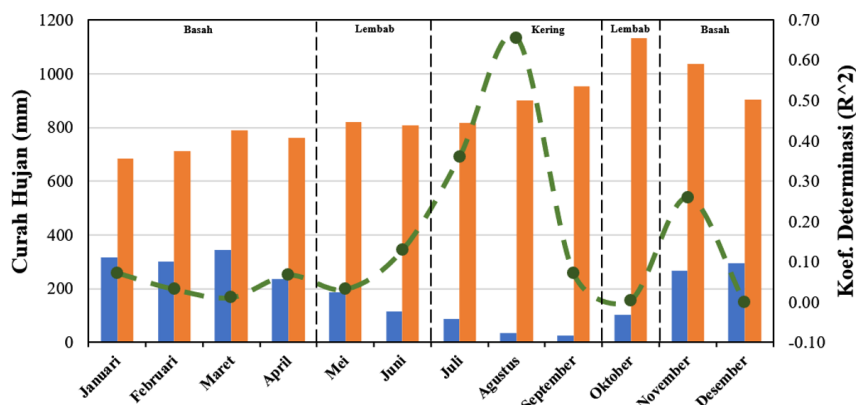
3.6 Pengaruh Variabel Curah Hujan terhadap Konsentrasi Karbon Monoksida (CO)

Analisis *time-series* pengaruh curah hujan terhadap konsentrasi CO dilakukan untuk melihat secara keseluruhan bagaimana tren yang terjadi selama periode tahun 2023. Informasi curah hujan dan konsentrasi CO di Kota Bandung tahun 2023 dapat dilihat pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Curah Hujan dan Konsentrasi CO Kota Bandung Tahun 2023

Bulan	Curah Hujan (mm)	Konsentrasi CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Januari	316,11	684,48
Februari	300,41	711,40
Maret	344,32	789,66
April	235,48	763,42
Mei	186,14	819,24
Juni	116,94	807,17
Juli	87,52	817,74
Agustus	36,42	902,29
September	26,20	954,53
Oktober	103,27	1132,82
November	268,30	1037,46
Desember	294,94	905,66

Selama tahun 2023, Kota Bandung telah terjadi hujan dengan rata – rata curah hujan 193 mm dan konsentrasi CO sebesar 860,49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada musim basah (Januari – April, November, Desember) curah hujan relatif tinggi dan konsentrasi CO cenderung lebih rendah pada awal tahun (Januari, Februari), akan tetapi meningkat di akhir tahun. Tren pengaruh kedua variabel dapat dilihat pada **Gambar 11**.



Gambar 14. Tren Pengaruh Curah Hujan terhadap Konsentrasi CO Tahun 2023

Pada bulan basah (Januari–April dan Desember), curah hujan yang tinggi berperan dalam menurunkan konsentrasi CO di atmosfer, sementara pada bulan lembap, curah hujan yang lebih rendah tidak cukup signifikan dalam mengurangi CO. Nilai R² cenderung lebih tinggi selama bulan kering, hal tersebut menunjukkan hubungan kuat antara rendahnya curah hujan dan peningkatan CO. Sebaliknya, pada bulan-bulan dengan curah hujan tinggi, nilai R² menunjukkan bahwa meskipun curah hujan berpengaruh, akan tetapi terdapat faktor lain yang mempengaruhi konsentrasi CO. Rincian hubungan ini dijelaskan dalam **Tabel 10**.

Tabel 10. Pengaruh Curah Hujan terhadap Konsentrasi CO Kota Bandung Tahun 2023

Bulan	Curah Hujan (mm)	Kelompok Iklim	Konsentrasi CO (µg/m ³)	r	R ²
Januari	316,11	Basah	684,48	0,27	0,07
Februari	300,41		711,40	0,18	0,03
Maret	344,32		789,66	0,11	0,01
April	235,48		763,42	-0,26	0,07
Mei	186,14	Lembap	819,24	0,18	0,03
Juni	116,94		807,17	-0,36	0,13
Juli	87,52		817,74	0,60	0,36
Agustus	36,42	Kering	902,29	0,81	0,66
September	26,20	Lembap	954,53	0,27	0,07
Oktober	103,27		1132,82	0,07	0,005
November	268,30		1037,46	-0,51	0,26
Desember	294,94	Basah	905,66	-0,01	0,0001

4. KESIMPULAN

Metode pengindraan jauh berbasis citra satelit terbukti menjadi alternatif untuk memantau kualitas udara parameter CO. Uji regresi menunjukkan korelasi moderat dengan nilai R² sebesar 0,30 yang berarti data citra satelit Sentinel-5P mampu menjelaskan 30% variasi pengukuran SPKUA dengan RMSE sebesar 250 µg/m³. Meskipun menggunakan metode yang berbeda, kedua metode pengukuran sekuat secara umum tanpa bias sistematis signifikan. Analisis *time-series* pada tahun 2023 di Kota Bandung menunjukkan bahwa curah hujan berpengaruh besar terhadap polusi CO selama bulan kering, dengan kontribusi sebesar 36% dan korelasi positif ($r=56$). Sebaliknya, pada bulan basah, curah hujan yang tinggi cenderung berperan dalam menurunkan polusi CO. Berdasarkan hal tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa curah hujan berperan penting terhadap akumulasi polusi udara gas CO di

suatu tempat. Penelitian ini juga menekankan pentingnya metode penginderaan jauh dan pemantauan kualitas udara, terutama selama bulan kering, untuk mengurangi polusi CO.

DAFTAR PUSTAKA

- Anoka-Ramsey Community College. (2024). Introduction to Chemistry. California: LibreTexts.
- Arshad, A., Zhang, W., Zhang, Z., Wang, S., Zhang, B., Cheema, M. J., & Shalamzari, M. J. (2021). Reconstructing high-resolution gridded precipitation data using an improved downscaling approach over the high altitude mountain regions of Upper Indus Basin (UIB). *Science of the Total Environment*, 784, 147140.
- BPS. (2023). Statistik Indonesia 2023. Indonesia: BPS.
- Cakmak, N., Yilmaz, O. S., & Sanli, B. F. (2023). Spatio-temporal Analysis of Pollutant Gases using Sentinel-5P TROPOMI Data on the Google Earth Engine during the COVID-19 Pandemic in the Marmara Region, Türkiye. *Electronic Collection of Papers of the Faculty of Civil Engineering*, 13(25).
- Chen, F., Liu, Y., Liu, Q., & Li, X. (2014). Spatial Downscaling of TRMM 3B43 Precipitation Considering Spatial Heterogeneity. *International Journal of Remote Sensing*, 3074 - 3093.
- Ferrara, C., Chianucci, F., & Bajocco, S. (2023). On the Temporal Mismatch between in-situ and Satellite-Derived Spring Phenology of European Beech Forests. *International Journal of Remote Sensing*, 44(5), 1684 - 1701.
- Khairina, M. (2019). The Description of CO Levels, COHb Levels, And Blood Pressure of Basement Workers X Shopping Centre, Malang. *Journal of Enviromental Health*, 11(2), 150 - 158.
- Pangerapan, S., Sumampouw, O., & Joseph, W. (2019). Analisis Kadar Karbon Monoksida (CO) Udara Di Terminal Beriman Kota Tomohon Tahun 2018. Manado: Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Sam Ratulangi Manado.
- Rarasati, A., & Afgatiani, P. M. (2020). Pemanfaatan Data Sentinel-5 Untuk Pemantauan Perubahan Kualitas Udara NO₂ Akibat Pandemi COID-19 Di Jakarta. *INDERAJA*, XI(13).
- Sasminto, R. A., Tunggul, A., & Rahadi W, J. (2014). Analisis Spasial Penentuan Iklim Menurut Klasifikasi Schmidt-Ferguson dan Oldeman di Kabupaten Ponorogo. *Jurnal Sumberdaya Alam & Lingkungan*.
- Sasmita, A., Reza, M., Elystia, S., & Adriana, S. (2022). Analisis Pengaruh Kecepatan dan Volume Kendaraan Terhadap Emisi dan Konsentrasi Karbon Monoksida di Jalan Jenderal Sudirman, Kota Pekanbaru. *Jurnal Teknik Sipil*, Volume 16(269-279), 1-11.
- Saventes, M. (2021). Air Pollution in Ukraine: a View from the Sentinel-5P Satellite. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 125(2), 271 - 290.
- Syafura, R., Rohmawati, F. Y., & Turyanti, A. (2023). Pengaruh Curah Hujan, Angin, dan Kebakaran Hutan terhadap Sebaran dan Konsentrasi Karbon Monoksida. Bogor: Repository Institut Pertanian Bogor.
- Wang, N., Yu, J., Zhu, L., Wang, Y., & He, Z. (2021). Spatial Downscaling of Remote Sensing Precipitation Data in the Beijing-Tianjin-Hebei. *Journal of Computer and Communications*, 9(6), 191 - 202.
- Zhang, L., Su, Y., Li, Y., & Li, P. (2023). Estimating urban land subsidence with satellite data using a spatially multiscale geographically weighted regression approach. *Measurement*, 228, 114387.
- Zhu, H., Liu, H., Zhou, Q., & Cui, A. (2023). Towards an Accurate and Reliable Downscaling Scheme for High-Spatial-Resolution Precipitation Data. *Remote Sensing*, 15(10), 2640.