

Pendekatan Geospasial untuk Mengungkap Hubungan Lahan Hutan dan Emisi Karbon Monoksida dalam Mendukung Perencanaan Tata Ruang Hijau di Kabupaten Grobogan

Rifqi Ramadhan^{1*}, Rafif Hasabi²

¹⁻²Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, Indonesia

rifqi.ramadhan@bps.go.id¹, rafifhasabi@bps.go.id²

*Penulis Korespondensi: rifqi.ramadhan@bps.go.id

Abstract. *High concentrations of carbon monoxide (CO) resulting from industrial activities, transportation, and land cover change can pose environmental and health risks in Grobogan District. This study uses remote sensing data and spatial analysis to map the spatial distribution of CO concentrations and forest land cover at the village level. The findings of this study show a strong and significant negative spatial correlation (Bivariate Moran's I = -0.467) between forest land and CO concentrations. There are five clusters, with the Low-High cluster (66 villages) in several subdistricts such as Godong, Penawangan, and Karangrayung requiring special attention because the low forest land in these areas is surrounded by high CO concentrations in the surrounding areas. This study makes an important contribution to adaptive environmental and spatial mapping. In addition, the results support the achievement by offering policy strategies that are in line with the principles of green development. Furthermore, this study emphasizes the important role of pentahelix collaboration in strengthening the spatial planning to environmental risks in Grobogan Regency.*

Keywords: *Carbon Monoxide Concentration; Forest Land Cover; Remote Sensing; Spatial Analysis; Sustainable Development*

Abstrak. Konsentrasi karbon monoksida (CO) yang tinggi akibat aktivitas industri, transportasi, dan perubahan tutupan lahan dapat menimbulkan risiko lingkungan dan kesehatan di Kabupaten Grobogan. Penelitian ini menggunakan data *remote sensing* dan analisis spasial untuk memetakan distribusi spasial konsentrasi CO dan tutupan lahan hutan pada level kelurahan/desa. Temuan dari penelitian ini menunjukkan korelasi spasial negatif yang kuat dan signifikan (Bivariate Moran's I = -0,467) antara lahan hutan dan konsentrasi CO. Terdapat lima klaster yang dihasilkan, dengan klaster Low-High (66 desa) di beberapa kecamatan seperti Godong, Penawangan, dan Karangrayung perlu mendapat perhatian khusus karena lahan hutan rendah di wilayah tersebut dikelilingi konsentrasi CO tinggi wilayah sekitarnya. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pemetaan lingkungan dan tata ruang yang adaptif. Selain itu, hasil penelitian mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan dengan menawarkan strategi kebijakan yang selaras dengan prinsip pembangunan hijau. Lebih lanjut, penelitian ini menekankan peran penting kolaborasi pentahelix dalam memperkuat perencanaan tata ruang terhadap risiko lingkungan di Kabupaten Grobogan.

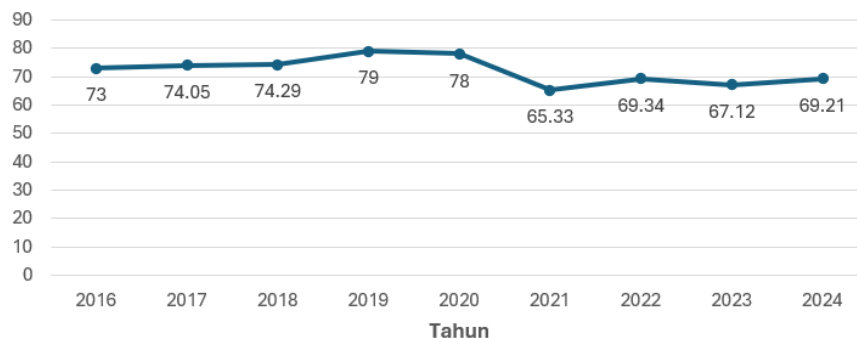
Katakunci : Analisis Spasial; Konsentrasi Karbon Monoksida; Pembangunan Berkelanjutan; Remote Sensing; Tutupan Lahan Hutan

1. LATAR BELAKANG

Secara global, emisi karbon monoksida (CO) berada pada level yang cukup tinggi (Organization & others, 2021), dengan kontribusi utama dari pembakaran biomassa, transportasi, dan industri (European Environment Agency, 2022; Rose et al., 2017). *World Health Organization* (WHO) melaporkan bahwa pada tahun 2020 polusi udara menjadi penyebab sekitar 3,2 juta kematian yang mencakup 237.000 kematian balita di bawah 5 tahun (World Health Organization, 2022). Paparan CO yang tinggi menimbulkan beberapa efek seperti sakit kepala, nyeri dada, infeksi saluran pernafasan akut (ISPA), hingga memperparah penyakit kardiovaskular (Afzal et al., 2025; Gözübüyük, 2017). Selain berdampak langsung terhadap kesehatan manusia, CO juga berkontribusi secara tidak langsung terhadap perubahan

iklim melalui keterlibatannya dalam reaksi kimia atmosfer yang menghasilkan ozon troposferik (Kabir et al., 2023).

Kondisi tersebut juga menjadi perhatian di Kabupaten Grobogan, Provinsi Jawa Tengah. Aktivitas ekonomi yang cukup tinggi, terutama dari sektor pertanian dan industri seperti pabrik semen di Kecamatan Tanggunharjo dan letak geografis strategis dekat dengan Kota Semarang, mendorong pertumbuhan ekonomi di wilayah Grobogan (Badan Pusat Statistik Kabupaten Grobogan, 2025). Namun, peningkatan aktivitas industri dan transportasi berpotensi meningkatkan emisi CO (Hasabi et al., 2024; Kurniawan et al., 2025), di mana industri semen/kapur bertanggung jawab atas lebih dari 7 persen emisi, sedangkan sektor transportasi menyumbang emisi dari kendaraan bermotor (Miller et al., 2021; Putranto et al., 2025). Kondisi ini tercermin pada tren nilai Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH) yang cenderung menurun dari 73,00 pada 2016 menjadi 69,21 pada 2024 (lihat Gambar 1) (Republik Indonesia, 2024). Selain itu, pertumbuhan penduduk dan ekonomi mendorong alih fungsi lahan hutan menjadi pertanian, permukiman, dan industri (Kamran et al., 2023), sehingga mengurangi area hijau sebagai penyerap polutan dan penyangga ekosistem, melepaskan karbon tersimpan (D. Li et al., 2024), meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca (Jat et al., 2022), dan menurunkan kemampuan wilayah menyerap air hujan, sehingga meningkatkan risiko bencana hidrometeorologi seperti banjir, kekeringan, dan kebakaran lahan (Daro Justine & Seenath, 2025) seperti yang terjadi di Grobogan dalam beberapa tahun terakhir.



Gambar 1. Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH) Kabupaten Grobogan Tahun 2016-2023

Permasalahan tersebut menjadi tantangan utama dalam perencanaan pembangunan daerah Grobogan. Di Indonesia, Undang-Undang No. 26 Tahun 2007 tentang penataan ruang (Republik Indonesia, 2007) mewajibkan penilaian wilayah yang menjadi dasar perencanaan tata ruang yang adaptif. Sejalan dengan itu, RPJMD Kabupaten Grobogan tahun 2021-2026 menegaskan bahwa isu penurunan kualitas lingkungan dan perubahan tutupan lahan telah diidentifikasi sebagai masalah strategis yang perlu diatasi melalui pengendalian pemanfaatan

ruang (Republik Indonesia, 2021). Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) menjadi instrumen penting untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan pembangunan dan daya dukung lingkungan. Selain itu, arah kebijakan RKPD Grobogan tahun 2025 menekankan program unggulan Teknik Holistik Integratif Spasial (THIS) yang bertujuan meningkatkan kualitas penataan ruang dan ketahanan bencana melalui implementasi RTRW sebagai acuan pengendalian ruang (Republik Indonesia, 2025). Oleh karena itu, upaya perencanaan tata ruang berbasis bukti yang sejalan dengan prinsip pembangunan hijau (*green development*) menjadi penting dan krusial dilakukan untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan. *Green development* dapat dipahami sebagai pendekatan pembangunan yang menyeimbangkan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk mencapai kemajuan yang berkelanjutan (Lin et al., 2024), sekaligus menekankan peningkatan kapasitas manusia untuk hidup berkelanjutan melalui inovasi hijau, pengendalian polusi, dan praktik ramah lingkungan (Albort-Morant et al., 2016).

Perencanaan tata ruang berbasis bukti yang baik memerlukan ketersediaan data spasial yang mendukung pembangunan hijau. Namun, di Kabupaten Grobogan belum tersedia data resmi dan terkini pemetaan lahan hutan dan konsentrasi CO. Padahal, tanpa informasi spasial yang memadai, kebijakan tata ruang berisiko tidak tepat sasaran dan dapat memperburuk degradasi lingkungan (Kurniawan et al., 2025). Salah satu pendekatan yang mampu menyediakan data spasial secara cepat, akurat, dan periodik adalah *remote sensing* (penginderaan jauh) (Behera et al., 2022; Kurniawan et al., 2025; Ramadhan et al., 2023; Ramadhan & Wijayanto, 2023). *Remote sensing* adalah teknik pengumpulan informasi tentang objek atau fenomena di permukaan bumi tanpa kontak fisik langsung melalui citra satelit (Khorram et al., 2016). Penelitian terkini telah menggunakan *remote sensing* untuk memetakan wilayah rawan kekeringan di Grobogan (Dewa et al., 2023; Farah et al., 2024). Namun, pemanfaatan *remote sensing* untuk perencanaan tata ruang di wilayah Grobogan masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki posisi penting dalam mengisi kesenjangan tersebut dengan menyediakan data spasial yang akurat untuk mendukung perencanaan tata ruang adaptif, pengurangan risiko bencana, dan pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) tujuan ke 11, 13, dan 15 (United Nation, 2022).

Hubungan antara pencemaran udara oleh CO dan tutupan hutan tidak dapat dipahami secara sederhana tanpa mempertimbangkan aspek spasial, karena polusi dan vegetasi cenderung mempengaruhi satu sama lain berdasarkan kedekatan geografis (Kurniawan et al., 2025). Hingga saat ini, belum ada penelitian di wilayah Grobogan yang secara spesifik membahas hubungan tersebut, padahal pemahaman ini sangat penting untuk mendukung

penataan ruang berbasis *green development* (Dong et al., 2023). Oleh karena itu, analisis spasial diperlukan untuk menangkap pola distribusi antara kedua variabel secara lebih mendalam. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi wilayah dengan lahan hutan rendah dan konsentrasi CO tinggi, yang penting untuk perencanaan tata ruang dan kebijakan lingkungan yang lebih adaptif.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memetakan distribusi spasial konsentrasi CO dan lahan hutan di Kabupaten Grobogan menggunakan data *remote sensing*, serta menganalisis keterkaitan spasialnya. Pendekatan ini memberikan pemetaan pola hubungan lahan hutan dan konsentrasi CO yang granular pada level kelurahan/desa. Dengan memanfaatkan data *remote sensing*, data dapat diperbarui secara berkala dan dapat diadaptasi pada wilayah dan periode lainnya. Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan wawasan untuk perencanaan tata ruang hijau berbasis bukti. Selain itu, penelitian ini mendukung pembangunan hijau (*green development*) melalui penyediaan informasi spasial dan rekomendasi kebijakan untuk mitigasi polusi udara dan peningkatan kualitas lingkungan hidup. Lebih lanjut, hasil penelitian ini berkontribusi terhadap pencapaian tujuan pembangunan (SDGs) 11, 13, dan 15. Penelitian ini juga menegaskan pentingnya kolaborasi pentahelix antara pemerintah, akademisi, masyarakat, dan media untuk merancang serta mengimplementasikan strategi pengelolaan ruang yang adaptif, efektif, dan berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dari permasalahan mengenai belum tersedianya data spasial mengenai pemetaan lahan hutan dan konsentrasi karbon monoksida (CO) untuk mewujudkan pembangunan hijau di Kabupaten Grobogan. Untuk menjawab permasalahan tersebut, maka digunakan sumber data *remote sensing* dengan biaya pengumpulan data yang lebih rendah serta waktu yang lebih cepat dan akurat. Untuk menggambarkan pola hubungan antara lahan hutan dan konsentrasi CO, maka digunakan analisis spasial hingga pada level yang lebih granular yaitu kelurahan/desa untuk mendukung perencanaan tata ruang yang lebih komprehensif.

Data dan Sumber Data

Dalam penelitian ini, analisis spasial antara konsentrasi CO dan lahan hutan di Kabupaten Grobogan dilakukan dengan memanfaatkan data sekunder hasil *remote sensing* berupa citra satelit optik. Hasil citra yang digunakan adalah Sentinel-2 *Multi Spectral Instrument* (MSI) Level 2A dengan resolusi spasial hingga 10 m untuk mendapatkan pemetaan klasifikasi tutupan lahan. Pemanfaatan data klasifikasi tutupan lahan mampu menggambarkan

kondisi permukaan bumi berdasarkan jenis fisiknya yang dapat membantu dalam analisis spasial serta perencanaan tata ruang wilayah (Hersperger et al., 2018). Pada penelitian ini, kelas tutupan lahan yang diklasifikasikan adalah lahan hutan, lahan pertanian, lahan terbangun, badan air, dan padang rumput.

Selain itu, untuk mendapatkan kondisi kualitas udara maka digunakan data konsentrasi CO dalam satuan mol/m^2 yang bersumber dari produk *Offline Level 3 (L3) Sensor Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI)* pada citra satelit Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) dengan resolusi spasial mencapai 1.113,2 m. Konsentrasi CO dapat mengidentifikasi kondisi polutan yang berasal dari aktivitas industri, pembakaran hutan dan energi, asap transportasi, dan aktivitas ekonomi yang tinggi pada wilayah padat permukiman penduduk (Ayoobi et al., 2021). Nilai CO yang digunakan adalah median agar lebih *robust* terhadap *outliers* dan diagregasi pada unit administrasi di level kelurahan/desa. Semua data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui platform *Google Earth Engine* dengan fokus waktu penelitian pada tahun 2024 di Kabupaten Grobogan.

Data

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan spasial antara konsentrasi polusi udara CO dan lahan hutan di Kabupaten Grobogan. Untuk mendapatkan data luas lahan hutan secara objektif dan akurat pada tahun 2024, maka dilakukan teknik *machine learning* untuk membantu dalam mengklasifikasikan tutupan lahan. Teknik ini memanfaatkan komputer melalui program tertentu untuk dapat belajar seperti manusia dalam hal mempelajari pola dan hubungan bermakna data, sehingga dapat digunakan untuk melakukan prediksi, estimasi, hingga klasifikasi dengan akurasi yang baik dalam jumlah data yang besar (Jordan & Mitchell, 2015). Proses klasifikasi dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest* yang merupakan salah satu model *machine learning*, yaitu dengan cara menggabungkan model-model pohon keputusan (*decision trees*) menjadi satu model pembelajaran utuh untuk memperoleh hasil klasifikasi melalui penggabungan setiap model pohon keputusan dengan suara prediksi terbanyak (Singh et al., 2021). Dengan demikian, hasil pemetaan tutupan lahan yang dihasilkan akan lebih akurat dan objektif sesuai yang ada di lapangan dengan biaya yang lebih rendah dan waktu yang cepat.

Data citra yang digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan adalah hasil citra satelit Sentinel-2 MSI Level 2A dengan kriteria tingkat tutupan awan (*cloud cover*) di bawah 20% selama periode Januari hingga Desember 2024, kemudian diproses untuk mendapatkan nilai median dari indeks spektral komposit guna menangani variasi temporal. Data pelatihan

klasifikasi tutupan lahan untuk model *Random Forest* diperoleh melalui penandaan manual (*hand labeling*) pada data citra, dengan cara menandakan enam kelas tutupan lahan yaitu badan air, lahan hutan, lahan terbangun/permukiman, lahan pertanian, lahan gersang/kosong, dan padang rumput. Total diperoleh 64.837 titik sampel yang tersebar di Kabupaten Grobogan dan selanjutnya dibagi menjadi dua bagian data yaitu 70% (45.460 titik sampel) untuk data pelatihan dan 30% (19.377 titik sampel) untuk validasi hasil pemodelan. Hasil klasifikasi menghasilkan pemetaan tutupan lahan dengan kelas lahan hutan sebagai kelas kedua, dan selanjutnya dihitung luasnya dalam satuan kilometer persegi (km²) pada level kelurahan/desa untuk analisis spasial lanjutan.

Data konsentrasi CO diperoleh melalui pengolahan citra satelit Sentinel-5P Produk *Offline* L3 dengan menerapkan filter koleksi data periode Januari hingga Desember 2024 untuk merepresentasikan densitas jumlah polusi CO, kemudian diterapkan perhitungan median spasial dari seluruh citra tahun tersebut untuk mengatasi variasi temporal terhadap batas administratif di level kelurahan/desa di Kabupaten Grobogan. Proses ini menghasilkan nilai konsentrasi CO dalam satuan mol/m² untuk setiap kelurahan/desa.

Untuk memahami bagaimana pola spasial penyebaran lahan hutan dan konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan pada tingkat kelurahan/desa, dilakukan analisis autokorelasi spasial global menggunakan *Moran's Indeks (I)*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui apakah distribusi kedua variabel tersebut membentuk pola mengelompok (*clustered*), acak (*random*), atau tersebar (*dispered*) secara geografis. Nilai *I* berkisar antara -1 hingga +1 dengan $I > 0$ menunjukkan adanya autokorelasi spasial positif atau kelurahan/desa dengan luas hutan atau CO yang tinggi cenderung dikelilingi oleh nilai area tetangga yang tinggi pula, sedangkan adanya autokorelasi spasial negatif apabila $I < 0$ dengan luas hutan atau CO yang tinggi cenderung dikelilingi oleh area tetangganya yang rendah atau sebaliknya, dan saat $I \approx 0$ maka terjadi pola acak tanpa hubungan spasial yang jelas. Untuk menguji signifikansinya, digunakan uji permutasi Monte Carlo dengan hipotesis H_0 yaitu tidak terdapat autokorelasi spasial (pola acak) dan H_1 yaitu terdapat autokorelasi spasial signifikan. Nilai *p-value* diperoleh dari proporsi hasil permutasi acak yang menghasilkan nilai $|I_{\text{permutasi}}| \geq |I_{\text{observasi}}|$, dengan taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ maka autokorelasi spasial dianggap signifikan apabila $p\text{-value} < 0.05$. *Moran's Index* dapat diperoleh melalui persamaan (1) berikut (Moran, 1950).

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Dengan I merupakan *Moran's Index*, N menunjukkan jumlah desa/kelurahan, x_i menunjukkan variabel spasial pada lokasi i , x_j menunjukkan variabel spasial pada lokasi j (tetangga dari i), $\bar{x}$ adalah rata-rata variabel spasial, dan w_{ij} merepresentasikan bobot spasial hubungan lokasi i dan j . Bobot spasial yang digunakan adalah *Queen Contiguity* yang ternormalisasi atau hubungan spasial antara dua lokasi bertetangga apabila saling berbagi sisi atau titik sudut, sehingga area yang bersentuhan secara tepi (*edge*) dan di titik pojok (*corner*) akan dianggap bertetangga dengan asumsi tidak bertetangga dengan dirinya sendiri (Wisnumurti et al., 2019). Dengan demikian $[w_{ij}]$ dapat dinotasikan seperti pada persamaan (2) berikut.

$$W = [w_{ij}] = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \cdots & w_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dengan w_{ij} bernilai 1 jika hubungan i dan j bertetangga dan 0 jika tidak bertetangga. Nilai bobot yang digunakan adalah telah dinormalisasi sehingga $w_{ij \text{ norm}}$ seperti pada persamaan (3) berikut.

$$w_{ij \text{ norm.}} = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^N w_{ij}} \quad (3)$$

Selanjutnya, untuk melihat hubungan spasial antara lahan hutan dan konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan, maka digunakan analisis *Bivariate Local Indicators of Spatial Association* (BILISA). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana distribusi luas lahan hutan pada level kelurahan/desa berhubungan dengan sebaran CO pada wilayah tetangga sekitarnya. Rentang nilai hubungan yaitu antara -1 hingga 1, dengan nilai positif menunjukkan bahwa wilayah dengan luas lahan hutan yang besar cenderung berdekatan dengan wilayah yang memiliki konsentrasi CO tinggi, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan berlawanan yaitu wilayah dengan lahan hutan besar berdekatan dengan wilayah yang memiliki CO rendah atau sebaliknya, sedangkan jika mendekati 0 menunjukkan tidak adanya hubungan spasial. BILISA diperoleh melalui persamaan (4) (Y. Li et al., 2023).

$$I_i^{xy} = z_i^x \sum_{j=1}^N w_{ij} z_j^y = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \cdot \sum_{j=1}^N w_{ij} \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (4)$$

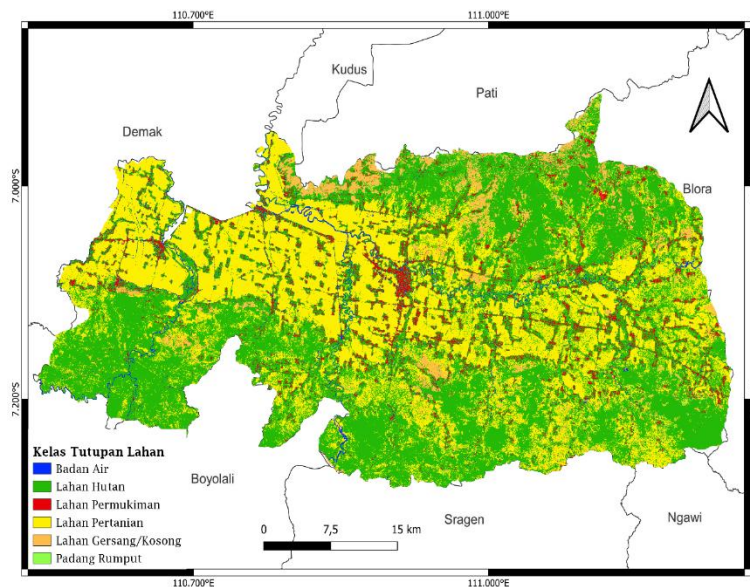
Dengan I_i^{xy} menggambarkan hubungan spasial antara lahan hutan konsentrasi CO, σ_x merupakan standar deviasi variabel spasial x dalam hal ini adalah luas lahan hutan dan σ_y adalah standar deviasi variabel spasial y yaitu konsentrasi CO.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini membahas tentang sebaran spasial dari lahan hutan yang diperoleh dari hasil klasifikasi tutupan lahan di Kabupaten Grobogan. Selain itu, penelitian ini membahas sebaran spasial dari konsentrasi CO sebagai emisi utama hasil aktivitas antropogenik. Bagian akhir, membahas tentang hubungan spasial antara lahan hutan dan konsentrasi CO pada level kelurahan/desa untuk pengelolaan lingkungan dan tata ruang yang efektif.

Pemetaan Tutupan Lahan Hutan di Kabupaten Grobogan

Berdasarkan hasil pengujian terhadap data validasi sebanyak 19.377 titik sampel menggunakan algoritma *Random Forest*, didapatkan akurasi keseluruhan sebesar 99,5% dalam mengklasifikasikan kelas tutupan lahan. Masing-masing kelas tutupan lahan memiliki hasil akurasi sebesar 100% pada kelas badan air, 99,6% pada kelas lahan hutan, 98,5% pada kelas lahan permukiman, 99,8% pada kelas lahan pertanian, 99,7% pada kelas lahan gersang/kosong, dan 86,4% pada kelas padang rumput. Nilai akurasi ini mengindikasikan bahwa algoritma *Random Forest* memiliki kemampuan yang baik dalam membedakan kelas-kelas tutupan lahan dan dapat menangkap variasi dan kompleksitas spektral pada data citra Sentinel-2A MSI dengan andal. Hasil pemetaan tutupan lahan Kabupaten Grobogan disajikan pada Gambar 2.

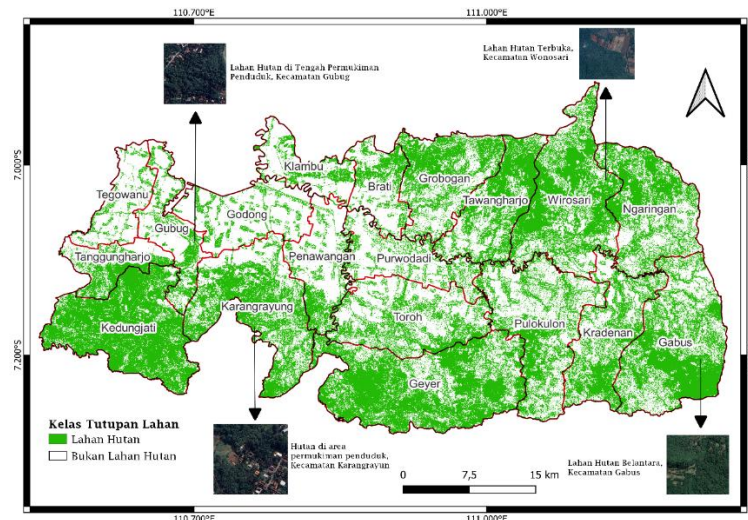


Gambar 2. Hasil Pemetaan Tutupan Lahan Kabupaten Grobogan Tahun 2024 (diolah)

Berdasarkan hasil estimasi luas, Kabupaten Grobogan didominasi oleh tutupan vegetasi yaitu lahan hutan seluas $\pm 1.018,17 \text{ km}^2$ (50,14%) dan lahan pertanian $\pm 756,16 \text{ km}^2$ (37,23%) yang memperlihatkan bahwa struktur lanskap Kabupaten Grobogan masih berbasis agraris. Tutupan vegetasi ini menandakan peran penting dalam mempertahankan fungsi ekologisnya sebagai kawasan penyerap CO. Selanjutnya, lahan permukiman mencakup $\pm 105,20 \text{ km}^2$ (5,18%) yang sebagian besar tersebar di pusat-pusat kecamatan seperti Purwodadi yang

memiliki aktivitas ekonomi yang tinggi dan kepadatan penduduk yang besar. Sementara itu, lahan gersang/kosong dan padang rumput mencakup porsi yang lebih kecil masing-masing $\pm 88,11 \text{ km}^2$ (4,34%) dan $\pm 31,18 \text{ km}^2$ (1,54%), sedangkan badan air hanya $\pm 31,86 \text{ km}^2$ (1,57%) yang sebagian besar di pada aliran sungai. Namun, adanya area lahan gersang atau kosong dapat menjadi indikator awal adanya degradasi lahan akibat tekanan pembangunan dan perubahan fungsi ruang sehingga fragmen ini berpotensi menurunkan kapasitas wilayah dalam menyerap karbon sehingga berimplikasi terhadap peningkatan konsentrasi CO. Secara keseluruhan, hasil klasifikasi tutupan lahan ini menjadi dasar penting untuk mendukung perencanaan tata ruang, konservasi vegetasi, dan mitigasi perubahan iklim di Kabupaten Grobogan.

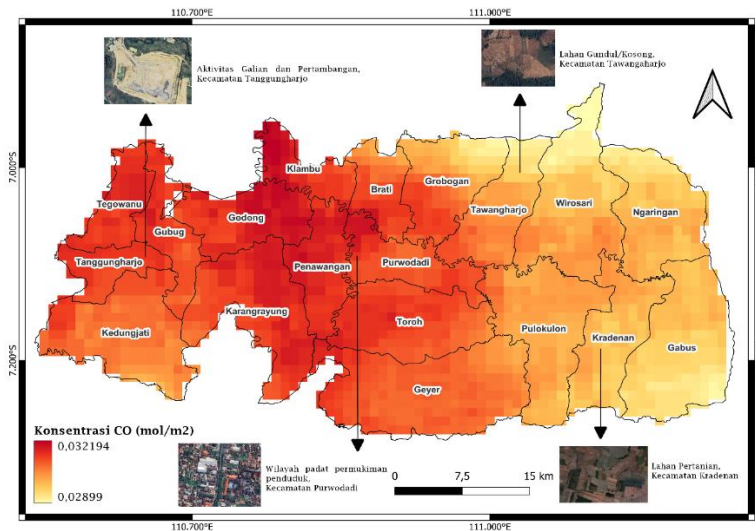
Berdasarkan hasil klasifikasi tutupan lahan yang diperoleh, terlihat bahwa lahan hutan memegang peran dominan dalam struktur ekologis di Kabupaten Grobogan. Untuk itu, dilakukan pemetaan lebih mendalam terhadap sebaran hutan guna menelaah bagaimana distribusi spasial lahan hutan dapat berpengaruh terhadap pola konsentrasi CO yang menjadi fokus analisis spasial penelitian ini. Sebaran spasial lahan hutan di Kabupaten Grobogan disajikan pada Gambar 3. Kawasan lahan hutan belantara lebih banyak ditemukan di bagian timur dan selatan seperti Kecamatan Gabus, Geyer, Ngaringan, dan Wirosari, serta Kedungjati di bagian barat yang menunjukkan di area tersebut berperan penting sebagai zona penyangga ekologis dalam menjaga keseimbangan kualitas udara. Sebaliknya, pada bagian barat dan tengah seperti Kecamatan Gubug, Godong, Penawangan, dan Purwodadi menunjukkan lahan hutan yang terbatas dan terfragmentasi sehingga mengindikasikan adanya tekanan antropogenik yang sejalan dengan dominasi permukiman, aktivitas pertanian intensif, dan perkembangan infrastruktur. Secara keseluruhan, pemetaan ini tidak hanya memberikan gambaran spasial mengenai distribusi lahan hutan, tetapi juga dapat menjadi analisis spasial awal untuk mengkaji hubungan spasial antara luasan hutan dan konsentrasi CO. Dengan akurasi yang tinggi dan terbaru, pemetaan ini dapat mendukung model spasial yang mengidentifikasi peran ekologis hutan dalam mitigasi polusi udara di tingkat regional. Hasil ini juga sejalan dengan prinsip *green development*, yang menekankan pentingnya pengelolaan ruang berbasis ekologi untuk menjaga kualitas udara dan keseimbangan lingkungan. Pemetaan tutupan lahan yang akurat berperan strategis dalam mendukung kebijakan pengendalian emisi dan peningkatan kualitas lingkungan hidup secara berkelanjutan (Lin et al., 2024).



Gambar 3. Hasil Estimasi Luas Lahan Hutan di Kabupaten Grobogan Tahun 2024 (diolah)

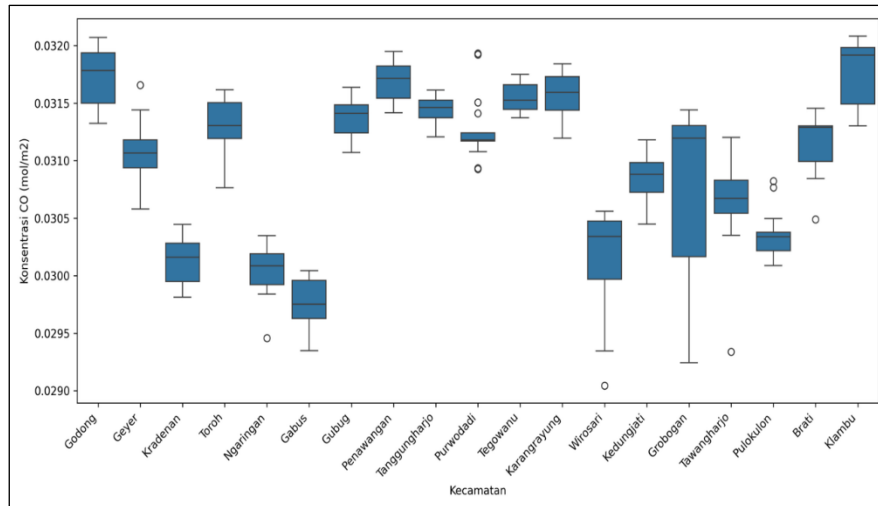
Analisis Sebaran Spasial Konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan

Sebaran spasial konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan sepanjang tahun 2024 divisualisasikan seperti pada Gambar 4. Pola sebaran konsentrasi CO bersifat heterogen dengan gradasi yang jelas dari wilayah barat ke timur. Wilayah pada bagian timur seperti Kecamatan Ngaringan, Gabus, Winosari, dan Kradenan cenderung memiliki kadar konsentrasi CO yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan wilayah tengah dan barat seperti Kecamatan Tegowanu, Gubug, Godong, Penawangan, dan Purwodadi yang memiliki konsentrasi CO yang lebih tinggi. Wilayah bagian tengah dan barat merupakan kawasan dengan kepadatan penduduk yang lebih tinggi, aktivitas ekonomi yang aktif, serta keberadaan aktivitas pertambangan terbuka dan lahan galian di Kecamatan Tanggunharjo yang menjadi sumber potensial peningkatan emisi CO. Selain itu, kepadatan jaringan jalan dan mobilitas transportasi dan ekonomi di sekitar pusat Kecamatan Purwodadi menjadi kontribusi antropogenik terhadap konsentrasi CO. Sebaliknya, wilayah pada bagian timur masih didominasi oleh lahan vegetasi seperti lahan hutan hijau yang berperan penting dalam menyerap dan menurunkan polusi udara. Secara lebih mendalam, pola spasial ini mengindikasikan adanya ketimpangan ekologis di mana wilayah barat dan tengah mengalami tekanan antropogenik yang menjadi pusat emisi CO, sementara wilayah timur berperan sebagai penyeimbang ekologis yang mempertahankan fungsi lingkungan. Dengan demikian, hasil analisis awal mengindikasikan adanya variasi spasial konsentrasi CO yang dipengaruhi oleh kondisi ekosistem vegetatif seperti lahan hutan. Temuan ini menjadi dasar penting untuk dianalisis lebih lanjut mengenai hubungan spasial antara lahan hutan dengan tingkat konsentrasi CO serta implikasinya terhadap perencanaan tata ruang hijau.



Gambar 4. Sebaran Spasial Konsentrasi Karbon Monoksida (CO) di Kabupaten Grobogan Tahun 2024 (diolah)

Analisis konsentrasi CO berdasarkan visualisasi spasial sebelumnya kemudian diperkuat melalui analisis *boxplot* untuk melihat variasi konsentrasi CO antar kecamatan seperti pada Gambar 5. Hasil menunjukkan adanya perbedaan distribusi nilai CO yang mencerminkan variasi karakteristik ekologis dan aktivitas antropogenik yang berbeda di tiap kecamatan. Kecamatan Godong, Klambu, dan Penawangan menempati sebagai kecamatan dengan konsentrasi CO yang tertinggi dengan rata-rata mendekati $0,032 \text{ mol/m}^2$, dimana pola ini sejalan dengan hasil pemetaan sebelumnya bahwa wilayah barat hingga tengah menjadi hotspot emisi CO karena merupakan pusat kegiatan antropogenik seperti aktivitas ekonomi dengan padat penduduk, jalur lalu lintas utama dengan mobilitas transportasi yang tinggi, serta adanya aktivitas pertambangan. Sebaliknya, kecamatan seperti Kradenan, Gabus, dan Ngaringan memperlihatkan nilai yang relatif lebih rendah dengan *boxplot* yang lebih sempit sehingga mengindikasikan kondisi atmosfer yang lebih stabil dan rendah polusi. Hal ini konsisten dengan dominasi tutupan vegetasi seperti lahan hutan di wilayah tersebut yang berfungsi sebagai penyerap polutan udara. Secara umum, hasil *boxplot* memperkuat temuan sebelumnya bahwa wilayah barat dan tengah memiliki konsentrasi CO yang lebih tinggi dibandingkan wilayah timur Kabupaten Grobogan.



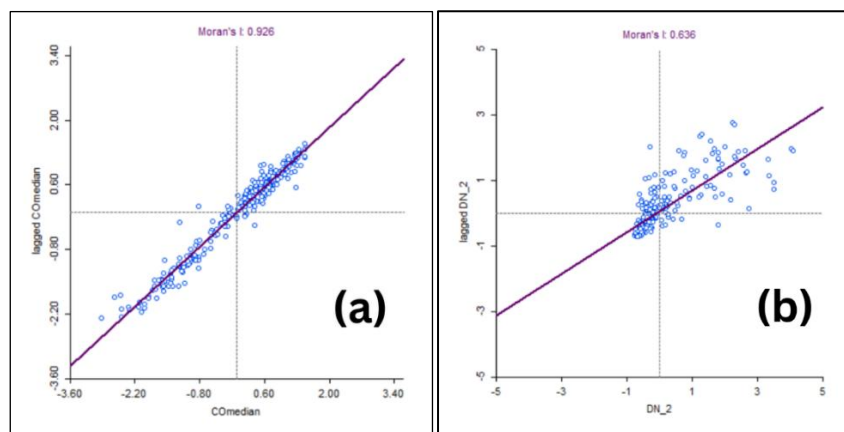
Gambar 5. Distribusi Konsentrasi Karbon Monoksida (CO) Menurut Kecamatan di Kabupaten Grobogan Tahun 2024

Analisis Autokorelasi Spasial Univariante

Data konsentrasi CO dalam mol/m^2 dan luas tutupan lahan hutan dalam km^2 yang telah diperoleh selanjutnya dihitung nilai *Global Moran's I* untuk melihat nilai autokorelasi spasial secara *univariate* atau bagaimana pola penyebaran nilai konsentrasi CO maupun lahan hutan pada level kelurahan/desa di Kabupaten Grobogan. Nilai *Global Moran's I* masing-masing variabel disajikan pada Tabel 1 dan *scatter plot Global Moran's I* disajikan pada Gambar 6.

Tabel 1. *Global Moran's I* Konsentrasi CO dan Lahan Hutan

Variabel	Moran's Index (I)	p-value	z-score	Signifikan	Distribusi
Konsentrasi CO	0,926	0,001	26,505	Ya	Cluster Positif
Lahan Hutan	0,636	0,001	18,397	Ya	Cluster Positif



Gambar 6. *Scatter Plot Global Moran's I* dari Konsentrasi (a) CO dan (b) Luas Hutan

Berdasarkan Gambar 6(a), diperoleh nilai *I* untuk konsentrasi CO sebesar 0,926 dengan *p-value* sebesar 0,001 sehingga signifikan seperti yang disajikan pada Tabel 1. Hal ini menunjukkan keputusan tolak H_0 yang artinya adanya autokorelasi positif yang sangat kuat,

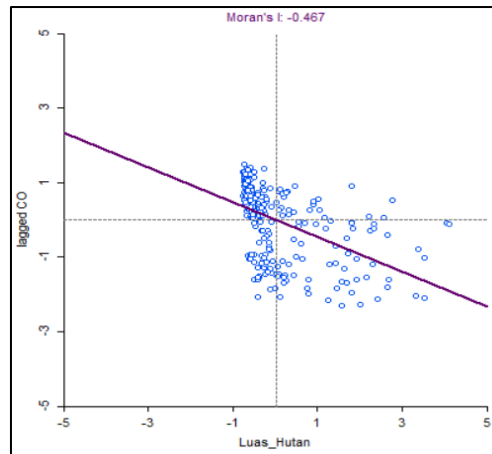
sehingga wilayah dengan konsentrasi CO tinggi cenderung berdekatan dengan wilayah lain yang juga memiliki konsentrasi tinggi, demikian pula sebaliknya wilayah dengan konsentrasi rendah saling berdekatan. Pola ini menegaskan bahwa sebaran konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan tidak bersifat acak (*random*), akan tetapi membentuk pola pengelompokan (*cluster*) secara spasial. Sementara itu, untuk lahan hutan seperti pada Gambar 6(b) diperoleh nilai I sebesar 0,636 dengan p -value sebesar 0,001 sehingga signifikan juga atau tolak H_0 seperti pada Tabel 1. Ini membuktikan bahwa sebaran lahan hutan di Kabupaten Grobogan juga membentuk pola pengelompokan (*cluster*) atau adanya autokorelasi spasial positif, di mana wilayah yang memiliki lahan hutan yang lebih luas cenderung berdekatan dengan wilayah lain yang juga memiliki lahan hutan yang luas, dan begitu pula sebaliknya untuk wilayah dengan luas hutan yang sempit. Temuan ini menegaskan bahwa lahan hutan dan konsentrasi CO sama-sama menunjukkan pola spasial mengelompok (*clustered pattern*) secara terpisah, akan tetapi belum dapat menggambarkan bagaimana hubungan spasial di antara keduanya. Oleh karena itu, untuk mengetahui lokasi-lokasi spesifik tentang hubungan spasial antara keduanya, maka langkah selanjutnya dilakukan analisis *Bivariate Moran's I* yang dibahas pada bagian selanjutnya.

Analisis Korelasi Spasial Luas Hutan dan Konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan

Untuk menganalisis lahan hutan pada level kelurahan/desa yang memiliki hubungan secara spasial terhadap konsentrasi CO, maka dilakukan perhitungan nilai *Bivariate Moran's I* seperti yang disajikan pada Tabel 2. Korelasi spasial antara lahan hutan terhadap konsentrasi CO di Kabupaten Gobogan sebesar -0,467 dengan p -value < 0.001, di mana menunjukkan korelasi negatif yang cukup kuat antar kedua variabel seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Ini mengindikasikan bahwa kelurahan/desa dengan lahan hutan yang sempit cenderung berdekatan dengan konsentrasi CO yang tinggi, sedangkan kelurahan/desa dengan lahan hutan yang besar berasosiasi dengan konsentrasi CO yang rendah. Dengan demikian, secara keseluruhan kedua variabel tersebut memiliki pola yang berlawanan arah (*inverse spatial relationship*) yang dapat memperkuat peran ekologis hutan sebagai penyeimbang gas CO.

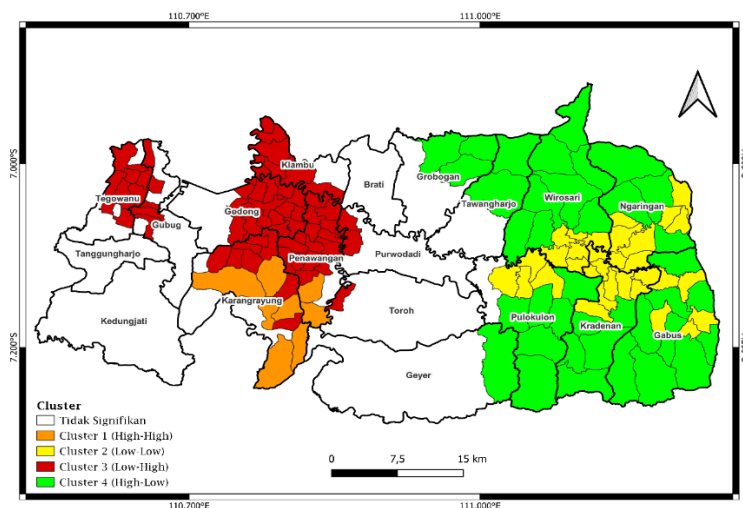
Tabel 2. *Bivariate Local Moran's I* dari Lahan Hutan terhadap Konsentrasi CO

Bivariate Moran's Index (I)	p-value	z-score	Signifikan	Hubungan
-0,467	0,001	-16,841	Ya	Autokorelasi Spasial Negatif



Gambar 7. Scatter Plot Bivariate Moran's I dari Luas Hutan dan Konsentrasi CO

Secara keseluruhan, nilai *Bivariate Moran's I* sebesar $-0,467$ memang menunjukkan hubungan spasial negatif antara lahan hutan dengan konsentrasi CO. Namun, hubungan spasial tersebut tidak selalu bersifat homogen di seluruh kelurahan/desa. Analisis dilanjutkan dengan mengidentifikasi kelurahan/desa yang menunjukkan keterkaitan spasial secara signifikan, baik yang searah maupun berlawanan arah melalui *cluster map* seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Clustering Map Hubungan Spasial Lahan Hutan dan Konsentrasi CO

Terdapat lima kategori pada *cluster map* untuk menunjukkan pola pengelompokan spasial kedua variabel tersebut (Guo et al., 2015). Kategori pertama adalah klaster *High-High* berwarna oranye sebanyak 8 kelurahan/desa, yang mencerminkan adanya *spatial overlap effect* (tumpang tindih spasial), di mana wilayah dengan luas hutan yang besar berdekatan dengan sumber emisi CO dan kondisi ini terjadi pada wilayah transisi antara aktivitas manusia yang padat, akan tetapi di sekitar lahan hutan yang besar atau *cross-boundary spatial interaction* (pengaruh spasial lintas batas). Kategori kedua adalah klaster *Low-Low* sebanyak 32 kelurahan/desa yang berwarna kuning, dapat dijelaskan sebagai wilayah dengan lahan hutan

yang sempit memiliki konsentrasi CO yang rendah di wilayah sekitarnya. Kondisi ini dapat disebabkan oleh minimnya tekanan antropogenik sehingga mencerminkan zona yang stabil.

Selanjutnya, kategori ketiga adalah klaster *Low-High* sebanyak 66 kelurahan/desa yang berwarna merah, menunjukkan *negative spillover effect* (efek limpahan spasial negatif) yaitu wilayah yang memiliki lahan hutan yang lebih sempit terpapar oleh emisi CO tinggi yang berasal dari kawasan sekitarnya. Hal ini dapat terjadi akibat lahan hutan lokal kurang mampu berperan sebagai *carbon sink* (penyerap karbon) yang efektif sehingga berpotensi mengalami tekanan lingkungan yang lebih besar. Kategori keempat adalah klaster *High-Low* sebanyak 38 kelurahan/desa yang berwarna hijau, yang dapat digambarkan sebagai wilayah dengan lahan hutan yang tinggi namun dikelilingi oleh wilayah tetangga dengan konsentrasi CO yang rendah sehingga dapat menjadi *buffer zone* (zona penyangga) yang mampu memperbaiki kualitas udara atau *spatial mitigation effect* (efek mitigasi spasial lintas wilayah). Kategori terakhir adalah klaster *Not Significant* sebanyak 136 kelurahan/desa yang berwarna putih, mengindikasikan bahwa lahan hutan lokal tidak berkorelasi signifikan secara spasial dengan wilayah sekitarnya sehingga dapat berasosiasi dengan variabel lain yang tidak digunakan dalam penelitian ini. Berikut Tabel 3 merupakan daftar rincian kelurahan/desa yang signifikan memiliki korelasi spasial antara lahan hutan dengan konsentrasi CO di wilayah sekitarnya

Tabel 3. Daftar Kelurahan/Desa yang Signifikan

Cluster	Keterangan	Kecamatan	Kelurahan/Desa
Cluster 1	High-High (luas hutan besar – konsentrasi CO tinggi)	Karangrayung	Cekel, Karanganyar, Karangsono, Ketro, Nampu, Sumberjosari
		Penawangan	Bologarang, Lajer
		Gabus	Gabus, Kalipang, Karangrejo, Sulursari, Tahunan
Cluster 2	Low-Low (Luas hutan rendah – konsentrasi CO rendah)	Kradenan	Banjardowo, Banjarsari, Crewek, Grabagan, Kalisari, Kuwu, Sambongbangi, Sengonwetan, Tanjungsari
		Ngaringan	Belor, Kalanglundo, Ngaraparap, Ngaringan, Pendem, Sarirejo, Sendangrejo, Truwolu
		Pulokulon	Jetaksari, Mangunrejo, Panunggalan, Pulokulon
		Wirosari	Dapurno, Kalirejo, Kropak, Kunden, Tambahrejo, Wirosari
		Godong	Anggaswangi, Bringin, Bugel, Dorolegi, Godong, Guci, Gundi, Guyangan, Jatilor, Kemloko, Ketangirejo, Ketitang, Klampok, Kopek, Sambung, Sumberagung, Werdoyo
		Gubug	Gubug, Kuwaron, Pranten, Tambakan, Tlogomulyo
		Karangrayung	Dempel, Mangin, Mojoagung, Pangkalan, Putatnganten, Rawoh, Telawah, Termas
Cluster 3	Low-High (Luas hutan rendah – konsentrasi CO tinggi)	Klambu	Jenengan, Kandangrejo, Klambu, Menawan, Penganten, Terkesi, Wandankemiri
		Penawanan	Curut, Jipang, Karangpaing, Karangwader, Kluwan, Kramat, Leyangan, Ngeluk, Penawangan, Pengkol, Pulutan, Tunggu, Watu
		Purwodadi	Pawon, Wedoro, Winong, Wolo
		Tegowanu	Cingkronk, Pulorejo
			Cangkring, Curug, Karangpasar, Kedungwungu, Kejawan, Mangunsari, Pepe, Tajemsari, Tegowanu Wetan, Tunjungharjo

Cluster	Keterangan	Kecamatan	Kelurahan/Desa
Cluster 4	High-Low (Luas hutan tinggi – konsentrasi CO rendah)	Toroh	Katong
		Gabus	Banjarejo, Bendoharjo, Keyongan, Nglinduk, Pandanharum, Pelem, Suwatu, Tlogotirto, Tunggulrejo
		Geyer	Karang Anyar
		Grobogan	Lebak, Lebengjumuk, Sedayu
		Kradenan	Bago, Kradenan, Pakis, Rejosari, Simo
		Ngaringan	Bandungsari, Kalangdosari, Sumberagung, Tanjungharjo
		Pulokulon	Jatiharjo, Mlowokarangtalun, Pojok, Randurejo, Sidorejo, Tuko
		Tawangharjo	Godan, Kemaduhbatur
		Wirosari	Dokoro, Gedangan, Karangasem, Mojorebo, Sambirejo, Tambakselo, Tanjungrejo, Tegalrejo

Sumber : Hasil Ananlisis Peneliti

Berdasarkan hasil analisis korelasi spasial antara lahan hutan dan konsentrasi CO di Kabupaten Grobogan yang telah dilakukan, ditemukan pola spasial yang bermakna secara ekologis. Secara keseluruhan, adanya pola spasial dari lahan hutan ($I = 0,636$) dan konsentrasi CO ($I = 0,926$) memperlihatkan adanya fragmentasi spasial hutan yang terklaster di bagian timur hingga selatan yang didukung oleh adanya *hotspot* polusi di bagian barat hingga pusat Kabupaten Grobogan yang sangat berkaitan dengan aktivitas antropogenik yang tinggi. Interpretasi pemetaan klaster memperkuat temuan tersebut, dimana adanya hubungan spasial negatif antara lahan hutan dan konsentrasi CO (*Bivariate Moran's I* = $-0,467$) pada wilayah dengan kategori *Low-High* (klaster 3) dan *High-Low* (klaster 4). Wilayah *Low-High* diperlukan intervensi kebijakan yang diarahkan kepada peningkatan ruang terbuka hijau minimal 30% melalui program reforestasi terarah yang berpotensi menurunkan konsentrasi CO akibat aktivitas antropogenik. Sedangkan, wilayah *High-Low* layak dijadikan sebagai model replikasi kebijakan koridor hijau untuk memperkuat konektivitas ekosistem antara kelurahan/desa. Namun, adanya fenomena anomali pada wilayah *High-High* sangat memerlukan proteksi ekologis yang lebih kuat melalui penerapan zona lindung serta pembatasan pembukaan lahan besar-besaran untuk mencegah degradasi fungsi hutan sebagai penyerap karbon jangka panjang. Sementara itu, kawasan *Low-Low* yang relatif stabil ideal untuk program ekspansi lahan hutan secara terencana. Area yang tidak signifikan juga perlu mendapatkan pemantauan preventif agar tidak bertransisi menjadi *hotspot* polusi di masa depan, terutama pada wilayah di sekitar *hotspot* polusi eksisting.

Temuan korelasi spasial negatif antara lahan hutan dan konsentrasi CO ini menegaskan pentingnya pendekatan *green development* dalam perencanaan tata ruang Kabupaten Grobogan. *Green development* dapat dipahami sebagai pendekatan pembangunan yang menyeimbangkan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk mencapai kemajuan yang berkelanjutan (Lin et al., 2024). Dalam konteks penelitian ini, konsep tersebut diterapkan

dengan menekankan keseimbangan antara fungsi ekologis hutan dan aktivitas antropogenik melalui perlindungan lingkungan, efisiensi sumber daya, dan mitigasi polusi (Dong et al., 2023). Dengan demikian, *green development* berperan sebagai kerangka strategis yang mengarahkan kebijakan spasial penguatan fungsi ekologis hutan sekaligus pengendalian emisi karbon untuk mendukung kualitas lingkungan yang berkelanjutan. Berdasarkan pola spasial yang teridentifikasi, diperlukan strategi intervensi yang spesifik dan adaptif sesuai karakteristik setiap klaster, mulai dari reforestasi terarah, penguatan zona lindung, hingga pengembangan koridor hijau terintegrasi. Rincian program dan langkah implementasi kebijakan berbasis temuan spasial ini diuraikan lebih lanjut pada bagian Rekomendasi Kebijakan. Implementasi strategi berbasis *green development* tersebut tidak hanya memperkuat kapasitas ekologis lokal, tetapi juga mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) 11, 13, dan SDG 15. Untuk memastikan strategi-strategi tersebut dapat diimplementasikan secara konsisten dan efektif, diperlukan kolaborasi pentahelix antara pemerintah, akademisi, masyarakat, dan media. Jika seluruh strategi implementasi ini dijalankan secara konsisten, maka Kabupaten Grobogan mampu meningkatkan IKLH sekaligus mengukuhkan posisinya sebagai kabupaten dengan arah pembangunan hijau yang maju, tangguh, dan berkelanjutan secara spasial ekologis.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengungkap adanya hubungan spasial negatif yang signifikan antara lahan hutan dan konsentrasi karbon monoksida (CO) di Kabupaten Grobogan pada tahun 2024. Wilayah dengan luas hutan sempit cenderung berdekatan dengan area yang memiliki konsentrasi CO tinggi, terutama di Kecamatan Godong, Penawangan, dan Purwodadi, yang didominasi aktivitas antropogenik. Sebaliknya, wilayah dengan tutupan hutan luas seperti Gabus, Kradenan, dan Wirosari menunjukkan konsentrasi CO yang lebih rendah, menegaskan fungsi ekologis lahan hutan sebagai penyerap polutan udara alami. Analisis spasial juga menunjukkan adanya pola pengelompokan (*clustering*) yang kuat antara kedua variabel. *Hotspot* polusi teridentifikasi di bagian barat dan tengah wilayah, sedangkan bagian timur Grobogan berfungsi sebagai *buffer zone* ekologis yang mempertahankan kualitas udara lebih baik. Secara metodologis, penelitian ini berkontribusi melalui pemanfaatan data *remote sensing* dan analisis spasial, yang memungkinkan pemetaan kondisi lingkungan secara akurat, objektif, dan efisien. Pendekatan ini tidak hanya relevan untuk mendukung perencanaan tata ruang yang adaptif dan berbasis bukti, tetapi juga berperan penting dalam upaya pengurangan risiko polusi udara, penguatan kapasitas mitigasi perubahan iklim, dan pencapaian tujuan pembangunan

berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan tindak lanjut melalui implementasi program strategis berbasis data dan pemberdayaan masyarakat, agar hasil penelitian ini dapat dioperasionalkan secara nyata dalam mewujudkan tata ruang dan pembangunan hijau berkelanjutan di Kabupaten Grobogan.

Berdasarkan temuan spasial pada bagian hasil dan pembahasan, penelitian ini menghasilkan sejumlah rekomendasi kebijakan untuk mendukung pengembangan tata ruang hijau di Kabupaten Grobogan. Rekomendasi pertama adalah program reforestasi komunitas “Grobogan Hijau Lestari” yang bertujuan meningkatkan tutupan hutan di wilayah bertipe *Low–High*, seperti Kecamatan Godong, Penawangan, dan Purwodadi, guna menurunkan konsentrasi CO. Program ini dapat diwujudkan melalui penanaman serentak pohon endemik, seperti jati, mahoni, dan akasia, pada lahan kritis, disertai penyediaan bibit gratis serta pelatihan teknik penanaman oleh Dinas Lingkungan Hidup. Rekomendasi kedua berupa program koridor ekologi “Jalur Hijau Grobogan” yang diarahkan untuk memperkuat konektivitas ekosistem di wilayah *High–Low*, seperti Gabus, Kradenan, dan Wirosari, sebagai zona penyangga ekologis. Implementasinya dapat dilakukan melalui penanaman vegetasi penghubung antarkawasan hutan untuk membentuk koridor hijau serta pengembangan taman biodiversitas. Selanjutnya, program pengendalian emisi “Udara Bersih Grobogan” direkomendasikan untuk wilayah *High–High*, seperti Karangrayung dan Penawangan, dengan tujuan menekan emisi CO melalui pemasangan sensor kualitas udara di pusat industri dan jalur transportasi, serta pemberian insentif bagi penerapan teknologi filter emisi dan energi terbarukan. Rekomendasi keempat adalah program agroforestri “Gemar Lestari” yang ditujukan bagi wilayah *Low–Low*, seperti Kradenan dan Ngaringan, guna mengintegrasikan pertanian berkelanjutan dengan hutan sosial demi menjaga stabilitas ekologis dan ekonomi. Program ini dapat dilaksanakan melalui pelatihan agroforestri bagi petani serta pengembangan biopori. Terakhir, program edukasi lingkungan “Grobogan Cerdas Hijau” diusulkan untuk meningkatkan kesadaran masyarakat dan mendorong penelitian lanjutan terkait pengelolaan lingkungan hijau berkelanjutan, antara lain melalui penyelenggaraan kampanye literasi lingkungan hijau berbasis digital.

Meskipun penelitian ini berhasil menganalisis hubungan spasial antara lahan hutan dan konsentrasi karbon monoksida di Kabupaten Grobogan secara komprehensif, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, klasifikasi lahan hutan dilakukan menggunakan metode *random forest* dengan jumlah sampel tertentu yang masih bisa ditingkatkan akurasinya, sehingga penelitian selanjutnya dapat menambah keragaman dan jumlah data pelatihan untuk menangkap variasi tutupan lahan yang lebih kompleks. Kedua, penelitian ini hanya mencakup data tahun 2024, sehingga penelitian mendatang dapat

memperkaya dengan analisis multi-temporal untuk melihat keterbandingan spasial antar waktu. Ketiga, penelitian ini hanya berfokus pada lahan hutan dan konsentrasi CO, sehingga penelitian selanjutnya dapat menambah variabel seperti meteorologi atau aktivitas industri dan transportasi untuk memberikan wawasan lebih holistik tentang faktor-faktor yang memengaruhi kualitas udara di Kabupaten Grobogan.

DAFTAR REFERENSI

- Afzal, M., Agarwal, S., Elshaikh, R. H., Babker, A. M. A., Choudhary, R. K., Prabhakar, P. K., Zahir, F., & Sah, A. K. (2025). Carbon monoxide poisoning: Diagnosis, prognostic factors, treatment strategies, and future perspectives. *Diagnostics*, 15(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15050581>
- Albort-Morant, G., Leal-Millán, A., & Cepeda-Carrión, G. (2016). The antecedents of green innovation performance: A model of learning and capabilities. *Journal of Business Research*, 69(11), 4912–4917. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.052>
- Ayoobi, A. W., Ahmadi, H., Inceoglu, M., & Pekkan, E. (2021). Seasonal impacts of buildings' energy consumption on the variation and spatial distribution of air pollutants over Kabul City: Application of Sentinel-5P TROPOMI products. *Air Quality, Atmosphere & Health*. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01085-9>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Grobogan. (2025). *Kabupaten Grobogan dalam angka 2025*. <https://grobogankab.bps.go.id/id/publication/2025/02/28/8c2e6a8a777dff15f92e26e9/kabupaten-grobogan-dalam-angka-2025.html>
- Behera, M. D., Mudi, S., Shome, P., Das, P. K., Kumar, S., Joshi, A., Rathore, A., Deep, A., Kumar, A., Sanwariya, C., Kumar, N., Chandrakar, R., Seshadri, S., Mukherjee, S., Bhattaram, S. K., & Sirivella, Z. (2022). COVID-19 slowdown induced improvement in air quality in India: Rapid assessment using Sentinel-5P TROPOMI data. *Geocarto International*, 37(25), 8127–8147. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1993351>
- Daro Justine, Y. E., & Seenath, A. (2025). Vegetative nature-based solutions for coastal flood risk management: Benefits, challenges, and uncertainties. *Ocean & Coastal Management*, 261, 107520. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107520>
- Dewa, K. H., Awaluddin, M., & Sabri, L. M. (2023). Analisis lokasi rawan bencana kekeringan menggunakan metode fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) di Kabupaten Grobogan tahun 2020. *Jurnal Geodesi Undip*, 445, 445–454.
- Dong, S., Ren, G., Xue, Y., & Liu, K. (2023). How does green innovation affect air pollution? An analysis of 282 Chinese cities. *Atmospheric Pollution Research*, 14(9), 101863. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101863>
- European Environment Agency. (2022). *Zero pollution monitoring assessment: Summary for policymakers*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Farah, U. N., Prasetyo, Y., & Bashit, N. (2024). Monitoring potensi kekeringan di Kabupaten Grobogan menggunakan penginderaan jauh dan sistem informasi geografis. *Media Komunikasi Geografi*, 25(1), 97–119. <https://doi.org/10.23887/mkg.v25i1.70308>

- Gözübüyük, A. A. (2017). Carbon monoxide intoxication epidemiology, pathophysiology, clinical evaluation, and treatment during childhood, in newborns, and fetus. *Northern Clinics of Istanbul*, 4(1), 100–107. <https://doi.org/10.14744/nci.2017.49368>
- Guo, G., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., Liu, X., & Zhang, X. (2015). Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landscape and Urban Planning*, 135, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.007>
- Hasabi, R., Kurniawan, R., Nurul, R., Wahyuni, T., & Nurmawati, E. (2024). Urban traffic congestion and its association with gas station density: Insights from Google Maps data. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 35(3), 1619–1627. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v35.i3.pp1619-1627>
- Hersperger, A. M., Oliveira, E., Pagliarin, S., Palka, G., Verburg, P., Bolliger, J., & Grădinaru, S. (2018). Urban land-use change: The role of strategic spatial planning. *Global Environmental Change*, 51(June 2017), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.001>
- Jat, M. L., Chakraborty, D., Ladha, J. K., Parihar, C. M., Datta, A., Mandal, B., Nayak, H. S., Maity, P., Rana, D. S., Chaudhari, S. K., & Gerard, B. (2022). Carbon sequestration potential, challenges, and strategies towards climate action in smallholder agricultural systems of South Asia. *Crop and Environment*, 1(1), 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.03.005>
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 253–255.
- Kabir, M., Habiba, U. E., Khan, W., Shah, A., Rahim, S., Rios-Escalante, P. R. D. los, Farooqi, Z. U. R., & Ali, L. (2023). Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on the environment in the 21st century: A mini review. *Journal of King Saud University - Science*, 35(5), 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>
- Kamran, Khan, J. A., Khayyam, U., Waheed, A., & Khokhar, M. F. (2023). Exploring the nexus between land use land cover (LULC) changes and population growth in a planned city of Islamabad and unplanned city of Rawalpindi, Pakistan. *Heliyon*, 9(2), e13297. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13297>
- Khorram, S., van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A. C., & Potts, M. D. (2016). Principles of applied remote sensing. In *Principles of Applied Remote Sensing* (pp. 1–380). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22560-9>
- Kurniawan, R., Hasabi, R., Wongsonadi, S. K., Gio, P. U., Purwanto, A., & Sumargo, B. (2025). Examining the influence of congestion, industry, and green open space on air quality vulnerability in green development in Jakarta. *Innovation and Green Development*, 4(3), 100247. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100247>
- Li, D., Ning, Z., Chen, G., Li, Y., Cui, B., Wang, Q., & Xie, T. (2024). The effect of land use and land cover on soil carbon storage in the Yellow River Delta, China: Implications for wetland restoration and adaptive management. *Journal of Environmental Management*, 367, 122097. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122097>
- Li, Y., Li, M., Song, X., Hu, X., Guo, X., & Qiu, Y. (2023). An integrated approach combining LISA, BI-LISA, and the modified COPK method to improve groundwater management in large-scale karst areas. *Journal of Hydrology*, 625(PB), 130111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130111>

- Lin, Y., Wang, Q. J., & Zheng, M. Q. (2024). Nexus among digital economy, green innovation, and green development: Evidence from China. *Emerging Markets Finance and Trade*, 60(4), 704–723. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2023.2258260>
- Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., & Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10), 1398–1411. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.011>
- Moran, P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1), 17–23.
- Organization, W. H., & others. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Putranto, A. W., Arifin, M. Z., Sutikno, F. R., Bowoputro, H., & Miftahulkhair, M. (2025). Modeling of carbon monoxide emission dispersion of vehicles in Malang City using Aermod. *EUREKA, Physics and Engineering*, 2025(2), 188–198. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003653>
- Ramadhan, R., & Wijayanto, A. W. (2023). Integrating satellite imageries and multiple geospatial big data for granular mapping of spatial distribution of the Human Development Index in East Java, Indonesia. *Proceedings of The International Conference on Data Science and Official Statistics*, 2023(1), 274–295. <https://doi.org/10.34123/icdsos.v2023i1.369>
- Ramadhan, R., Wijayanto, A. W., & Pramana, S. (2023). Geospatial big data approaches to estimate granular level poverty distribution in East Java, Indonesia using machine learning and deep learning regressions. *Proceedings of The International Conference on Data Science and Official Statistics*, 2023(1), 186–200. <https://doi.org/10.34123/icdsos.v2023i1.359>
- Republik Indonesia. (2007). *Undang-undang No. 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang*.
- Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Daerah Kabupaten Grobogan Nomor 8 Tahun 2021 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Kabupaten Grobogan Tahun 2021-2026*.
- Republik Indonesia. (2024). *Peraturan Daerah Kabupaten Grobogan Nomor 6 Tahun 2024 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah Tahun 2025-2045*.
- Republik Indonesia. (2025). *Peraturan Bupati Grobogan Nomor 9 Tahun 2025 tentang Perubahan Rencana Kerja Pemerintah Daerah Tahun 2025*.
- Rose, J. J., Wang, L., Xu, Q., McTiernan, C. F., Shiva, S., Tejero, J., & Gladwin, M. T. (2017). Carbon monoxide poisoning: Pathogenesis, management, and future directions of therapy. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 195(5), 596–606. <https://doi.org/10.1164/rccm.201606-1275CI>
- Singh, U., Rizwan, M., Alaraj, M., & Alsaidan, I. (2021). A machine learning-based gradient boosting regression approach for wind power production forecasting: A step towards smart grid environments. *Energies*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/en14165196>
- United Nation. (2022). *The Sustainable Development Goals Report 2022*. New York: United Nation.
- Wisnumurti, R. D., Pratiwi, H., & Handajani, S. S. (2019). Spatial lag fixed effect panel model with weights queen contiguity for economic growth data of ASEAN member countries.

Journal of Physics: Conference Series, 1306. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1306/1/012033>

World Health Organization. (2022). *World Health Statistics 2022 (Monitoring Health of the SDGs)*. In *Monitoring Health of the SDGs*. Geneva: World Health Organization.