

Asesmen Kualitas RTH Publik Menggunakan Indeks Vegetasi di Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda Kota Bandung

Raden Muhammad Alwan Faris Fadlirullah¹⁾, Adytia Heru Nugraha¹⁾,
Ammar Muhammad Nabil¹⁾, Yulia Asyiwati^{1*)}

¹⁾Perencanaan Wilayah dan Kota Universitas Islam Bandung, Bandung, Indonesia

ABSTRACT

Urban forest ecosystems are increasingly subject to significant anthropogenic pressures; however, the resulting ecological responses often exhibit a delayed manifestation. The Ir. H. Djuanda Forest Park (Tahura) serves as a vital urban conservation area in Bandung, Indonesia, which has experienced a massive surge in tourist volume. This study aims to analyze the "lag effect" of visitor pressure on vegetation quality dynamics over the 2015–2025 period. A descriptive quantitative approach was employed, integrating spatial analysis via Google Earth Engine (GEE) to extract Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values from Sentinel-2A satellite imagery. Statistical analyses, including Spearman correlation and linear regression, were conducted with time-lag intervals ranging from 0 to 5 years to identify the relationship between annual visitor numbers and the extent of high-density vegetation. The findings reveal no significant correlation at lag 0 ($\rho = -0.12$; $p > 0.05$). Conversely, a significant negative correlation emerged at lag 3 ($\rho = -0.61$; $p < 0.05$) and reached its peak at lag 5 ($\rho = -0.78$; $p < 0.01$). These results demonstrate a threshold of vegetation resistance, where physical degradation only becomes spectrally manifest after several years of cumulative disturbance. This study recommends the implementation of visitor management policies based on environmental carrying capacity that incorporate temporal variables to ensure the long-term sustainability of the Tahura Ir. H. Djuanda ecosystem.

ARTICLE INFO

Keywords: Anthropogenic Pressure, Delayed Response (Lag Effect), Google Earth Engine, NDVI, Vegetation Dynamics

***Corresponding author:**
yulia.asyiwati@unisba.ac.id

Article history:
Submitted 5 Feb 2026
Revised 25 Apr 2026
Accepted 7 May 2026
Online Available 7 May 2026
Published 20 May 2026



1. Pendahuluan

Urbanisasi menyebabkan pergeseran penggunaan lahan yang signifikan, hilangnya keanekaragaman hayati, dan fragmentasi ekologis. Hal ini juga memberikan kontribusi pada berbagai bentuk polusi dan memperburuk dampak perubahan iklim, terutama efek panas perkotaan [1]. Urbanisasi merupakan salah satu fenomena transformasi sosial-ekonomi terbesar di era modern yang membawa implikasi signifikan terhadap lingkungan perkotaan. Pertumbuhan kota yang pesat, didorong oleh peningkatan populasi, industrialisasi, dan ekspansi penggunaan lahan, telah menyebabkan perubahan mendasar pada sistem ekologis perkotaan [1], [2]. Perubahan tutupan lahan dan fragmentasi habitat akibat tekanan antropogenik ini berisiko menurunkan kemampuan ekosistem dalam menyimpan stok karbon dan mengancam keragaman flora endemik yang menjadi identitas kawasan [3]. Ruang Terbuka Hijau (RTH), khususnya dalam bentuk hutan kota, bukan sekadar pelengkap estetika kota, melainkan komponen esensial dalam menjaga keseimbangan ekologis melalui penyediaan jasa ekosistem (*ecosystem services*) yang komprehensif. Jasa ini mencakup fungsi regulasi iklim mikro, pendukung biodiversitas, penyediaan sumber daya, hingga fungsi budaya melalui rekreasi spiritual dan edukasi [4], [5]. Secara spesifik, keberadaan kanopi pohon yang rapat berperan vital dalam memitigasi efek *Urban Heat Island* (UHI) dengan menurunkan suhu permukaan melalui proses evapotranspirasi dan peneduhan [6].

Di Indonesia, fenomena degradasi kualitas lingkungan perkotaan semakin nyata, termasuk di Kota Bandung yang kini menghadapi tantangan serius akibat pemanasan lokal dan penurunan kualitas udara. Sebagai pusat aktivitas ekonomi di Jawa Barat, Kota Bandung mengalami tekanan pembangunan yang mengakibatkan sulitnya pemenuhan kuantitas RTH sesuai amanat regulasi tata ruang [7], sehingga memberikan dampak pada degradasi ekosistem alami dan hilangnya keanekaragaman hayati secara progresif. Salah satu Ruang Terbuka Hijau publik yang terdapat di Kota Bandung adalah Taman Hutan Raya (Tahura) Ir. H. Djuanda berfungsi sebagai "paru-paru kota" yang dapat memitigasi efek pemanasan global melalui proses sequestrasi karbon yang signifikan [8], sehingga dapat menjaga resiliensi ekologi

kota dan menyediakan layanan ekosistem vital bagi masyarakat [9]. Keberadaan struktur vegetasi yang sehat dan padat dalam sistem ini merupakan indikator utama keberhasilan pengelolaan lingkungan perkotaan yang adaptif terhadap perubahan iklim [9]. Tahura Djuanda diharapkan mampu mempertahankan integritas vegetasi yang tinggi untuk menjalankan fungsi hidrologis dan perlindungan tanah, sembari memberikan layanan jasa ekosistem budaya berupa rekreasi alam yang berkelanjutan bagi masyarakat [10].

Fakta empiris di lapangan menunjukkan adanya potensi benturan kepentingan yang signifikan antara fungsi konservasi dengan dan intensitas kegiatan manusia, terutama pasca-pandemi, di mana kebutuhan masyarakat akan interaksi langsung dengan lingkungan hijau (biophilia) meningkat untuk melakukan atraksi wisata alam, termasuk di Tahura Djuanda. Tingginya minat masyarakat terhadap wisata alam di Tahura Djuanda membawa konsekuensi pada tekanan lingkungan [11]. Peningkatan jumlah wisatawan yang tidak diimbangi dengan manajemen daya dukung (*carrying capacity*) dapat memicu fragmentasi habitat, pemadatan tanah, dan penurunan vitalitas vegetasi [12]. Degradasi kualitas vegetasi dan reduksi tutupan hijau di kawasan urban secara empiris memberikan implikasi sosio-ekologis yang signifikan, yang mencakup penurunan indeks kenyamanan publik serta pengikisan identitas visual lanskap kota [13]. Dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya mengindikasikan bahwa kondisi ekologis mayoritas hutan kota (RTH) di Kota Bandung masih berada di bawah standar baku, baik dari aspek densitas vegetasi maupun diversitas spesiesnya [7]. Hal ini dapat dilihat dari kondisi Tahura Djuanda dengan luas 527,03 ha mengalami tekanan sosio-ekologis yang dapat mengancam keberlanjutan fungsi lingkungannya. Intervensi manusia, yang termanifestasi melalui ekspansi jalur setapak ilegal dan pemadatan tanah, teridentifikasi memicu fragmentasi spasial dan mendegradasi kualitas kesehatan vegetasi di kawasan tersebut [14].

Celah riset saat ini berakar pada minimnya kerangka monitoring yang mensinergikan data biofisik dengan tekanan antropogenik secara spasial menjadi celah pengetahuan utama dalam studi ini. Hal tersebut terefleksi dari kurangnya literatur yang mengevaluasi secara spasial mengenai dampak dinamika kunjungan wisatawan terhadap kesehatan vegetasi di Tahura Ir. H. Djuanda. Studi mengenai Tahura Ir. H. Djuanda hingga kini umumnya terbatas pada inventarisasi stok karbon pada tipe tegakan tertentu [8] maupun kajian deskriptif mengenai manajemen pariwisata [11]. Belum ditemukan penelitian komprehensif yang secara khusus mengaplikasikan teknologi penginderaan jauh untuk mengidentifikasi pola hubungan antara intensitas kunjungan wisatawan dan penurunan kualitas hijau secara longitudinal (*time-series*). Meskipun pemetaan kerapatan vegetasi telah banyak menerapkan teknik Forest Canopy Density (FCD) [12], indeks Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dalam mendeteksi respons klorofil terhadap tekanan lingkungan. Fakta mengenai fluktuasi puncak wisatawan pada periode tertentu memang telah tersedia [15], namun bagaimana fenomena ini berimplikasi pada degradasi vegetasi secara temporal belum tereksplorasi secara mendalam melalui integrasi data penginderaan jauh. Melalui analisis respons spektral klorofil, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dapat menghasilkan akurasi signifikan dalam mendeteksi gejala stres vegetasi secara preventif, sehingga dapat mengidentifikasi dan memantau kondisi kesehatan tanaman sebelum terjadinya degradasi fisik yang tampak secara visual [16].

Penelitian ini didorong oleh kekhawatiran atas penurunan kualitas vegetasi Tahura yang berdampak luas terhadap ekosistem Kota Bandung. Mengacu pada korelasi signifikan antara kerapatan vegetasi berbasis NDVI dan cadangan karbon [8], degradasi vegetasi akibat aktivitas wisatawan berisiko menurunkan efektivitas mitigasi polusi dan pengaturan suhu lingkungan secara langsung. Dengan demikian, sinkronisasi antara data kunjungan dan kondisi biofisik lahan melalui asesmen berkala menjadi instrumen navigasi kebijakan yang sangat relevan dalam menjaga resiliensi ekosistem perkotaan [17]. Topik ini sangat relevan mengingat urgensi pencapaian target SDG 11 terkait pembangunan kota berkelanjutan [18], [19]. Ketidakmampuan dalam mengawasi kesehatan vegetasi di objek konservasi seperti Tahura Djuanda akan memperkuat kerentanan iklim urban serta menurunkan standar kualitas hidup akibat hilangnya fungsi penyaringan polutan alami [13]. Konsekuensinya, asesmen berbasis bukti ilmiah diperlukan untuk mensinergikan orientasi ekonomi pariwisata dengan prinsip keberlanjutan ekosistem.

Distingsi fundamental penelitian ini dibandingkan dengan kajian terdahulu terletak pada pemosisian variabel antropogenik, khususnya densitas wisatawan yang berfungsi sebagai determinan utama dalam pemodelan nilai Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) di kawasan Taman Hutan Raya (Tahura). Studi ini melampaui sekadar pemetaan kondisi eksis dengan memformulasikan

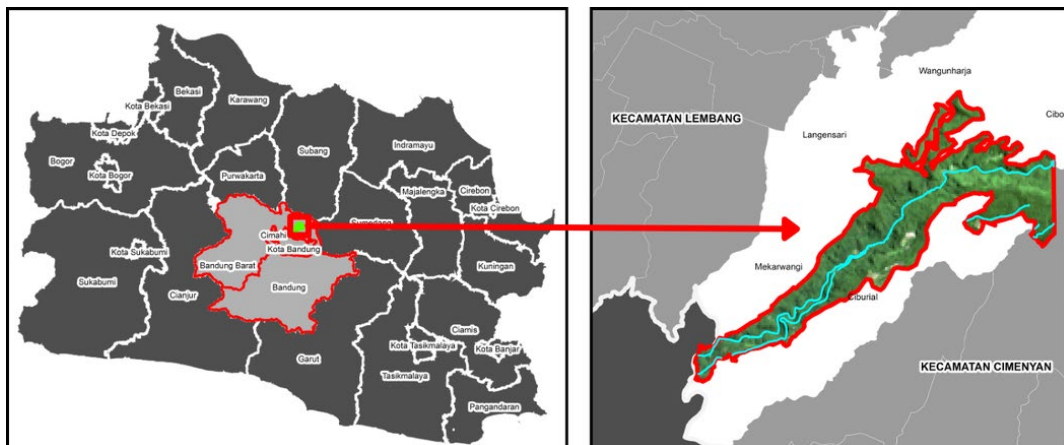
model penilaian kualitas yang mampu mengidentifikasi degradasi vegetasi secara spasial pada area terdampak beban aktivitas wisata yang eksefis. Pendekatan ini mengonstruksi perspektif dinamis mengenai interaksi antara aktivitas manusia dan integritas ekosistem, yang menjadi instrumen krusial bagi perencanaan wilayah dan kota berkelanjutan [20]. Penelitian ini menyajikan pendekatan baru dalam pemetaan kualitas vegetasi dengan mengintegrasikan jumlah wisatawan menggunakan analisis spasial berbasis NDVI di Tahura Ir. H. Djuanda Kota Bandung. Melalui metode ini, korelasi antara konsentrasi aktivitas manusia dan penurunan kualitas vegetasi dapat diidentifikasi, sehingga tersedianya basis data spasial yang krusial untuk pengembangan kebijakan zonasi konservasi yang lebih preventif dan protektif terhadap ekosistem hutan kota.

Penelitian ini diarahkan untuk mengasesmen integritas vegetasi di Tahura Ir. H. Djuanda dengan mengolaborasikan metode penginderaan jauh dan analisis korelasi jumlah pengunjung. Melalui pendekatan multidimensi, penelitian ini berupaya memetakan pola spasial kualitas RTH serta merumuskan hubungan kausalitas antara intensitas aktivitas pariwisata dengan fluktuasi kesehatan vegetasi. Secara akademis, studi ini berkontribusi pada khazanah perencanaan wilayah dalam konteks manajemen RTH yang resilien; sementara secara praktis, hasil penelitian ini berfungsi sebagai basis data fundamental dalam menyusun regulasi pengelolaan kegiatan pariwisata pada kualitas vegetasi, agar dapat menjaga keberlanjutan layanan hutan kota di Kota Bandung

2. Metode dan Hasil Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di kawasan Taman Hutan Raya (Taman Hutan Raya) Ir. H. Djuanda. Secara geografis, Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda terletak pada koordinat $107^{\circ} 30'$ Bujur Timur dan $6^{\circ} 52'$ Lintang Selatan. Kawasan ini memanjang dari arah selatan ke utara, mulai dari Dago Pakar di Kota Bandung hingga Maribaya di Lembang, Kabupaten Bandung Barat (**Gambar 1**). Elevasi kawasan bervariasi secara signifikan, mulai dari ± 770 mdpl di bagian selatan (lembah Sungai Cikapundung) hingga mencapai ± 1.350 mdpl di bagian utara (wilayah Maribaya/Lembang).



Gambar 1. Lokasi studi berada di Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda, Provinsi Jawa Barat.

Topografi wilayah didominasi oleh bentuk lahan perbukitan struktural dan vulkanik dengan lereng yang bervariasi dari agak curam hingga sangat terjal. Sungai Cikapundung membelah kawasan ini, menciptakan lembah sungai (*river valley*) yang dalam dan menjadi habitat penting bagi vegetasi riparian serta satwa liar. Berdasarkan aspek administrasi pemerintahan, Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda meliputi wilayah:

1. Desa Ciburial, Kecamatan Cimenyan di Kabupaten Bandung;
2. Desa Mekarwangi, Langensari, dan Cibodas di Kecamatan Lembang, Kabupaten Bandung Barat;
3. Kelurahan Dago, Kecamatan Coblong di Kota Bandung.

Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda dulunya merupakan hutan lindung yang mengalami alih fungsi menjadi taman hutan raya pada tahun 1985. Kawasan ini didominasi oleh hutan sekunder campuran

dengan tegakan pinus, mahoni, puspa, dan berbagai jenis pohon lokal lainnya (Ibrahim Miftahulhuda dkk., 2019), Kawasan ini merupakan rumah bagi koleksi tumbuhan alami maupun buatan, baik alami dari Indonesia ataupun tumbuhan dari luar negeri dengan jumlah vegetasi tidak kurang dari 100.000-an pohon, yang terdiri dari 108 famili dan 524 spesies. Koleksi ini mencakup jenis tanaman asli maupun introduksi. Lokasi ini dipilih secara purposif karena memiliki fungsi ekologis ganda yaitu sebagai kawasan konservasi dan destinasi wisata alam yang mengalami tekanan lingkungan akibat aktivitas wisata yang meningkat setiap tahunnya.

2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian mencakup dua variabel utama, yaitu jumlah pengunjung tahunan yang diperoleh dari Dinas Kehutanan Provinsi Jawa Barat dalam bentuk data tahunan dan Luasan vegetasi hijau dengan kerapatan tinggi (NDVI tinggi) yang diperoleh melalui analisis citra satelit Landsat dengan resolusi spasial 30 meter menggunakan Google Earth Engine (GEE) dan ArcMap 10.8 untuk mengubah data raster menjadi data numerik. Data citra diambil untuk periode 2015–2025 dan telah melalui proses koreksi dasar (*cloud masking*) sehingga siap digunakan untuk analisis vegetasi.

2.3 Pengolahan NDVI dan Klasifikasi Vegetasi

Indeks vegetasi dihitung menggunakan metode Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), yaitu transformasi spektral yang memanfaatkan perbedaan reflektansi antara kanal inframerah dekat (*near-infrared/NIR*) dan kanal merah (*red*) untuk mengidentifikasi kondisi vegetasi. Secara matematis, NDVI dinyatakan sebagai rasio antara selisih dan jumlah kedua kanal tersebut, sebagaimana dirumuskan pada **Persamaan 1** [21].

$$NDVI = \frac{(NIR - red)}{(NIR + red)} \quad (1)$$

Proses pengambilan citra dilakukan menggunakan Google Earth Engine dengan tahapan preprocessing berupa *cloud masking* dan komposit citra tahunan. Nilai NDVI kemudian diklasifikasikan kedalam lima kelas kategori kerapatan vegetasi [22] seperti pada **Tabel 1**. Data citra tersebut kemudian diekspor kedalam ArcMap 10.8 untuk mendapatkan data luasan kelas vegetasi dalam satuan hektar. Dalam penelitian ini, analisis difokuskan pada kelas vegetasi tinggi sebagai indikator utama kondisi ekosistem.

Tabel 1. Klasifikasi Kelas Kerapatan Vegetasi [22]

Klasifikasi	Kerapatan Tutupan
-1<NDVI<-0,03	Lahan tidak bervegetasi
-0,03<NDVI<0,15	Kehijauan Sangat Rendah
0,15<NDVI<0,25	Kehijauan Rendah
0,25<NDVI<0,35	Kehijauan Sedang
0,35<NDVI<1	Kehijauan Tinggi

2.4 Variabel dan Analisis Data

Penelitian ini menggunakan dua variabel utama, yaitu jumlah pengunjung sebagai variabel independen dan luas vegetasi tinggi pada NDVI sebagai variabel dependen. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *time-series* dengan mempertimbangkan efek keterlambatan (*lag*).

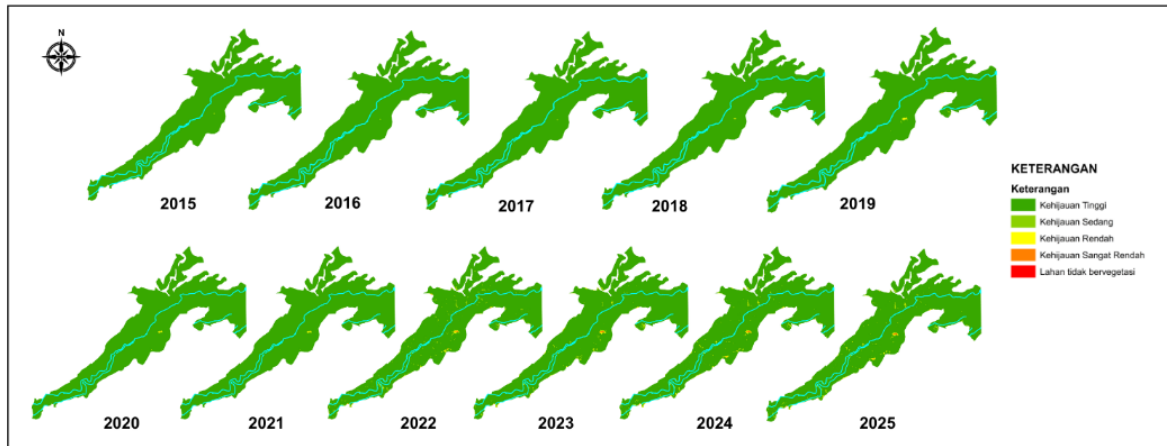
Analisis statistik meliputi:

- Korelasi Spearman untuk mengidentifikasi hubungan antar variabel
- Analisis *lag* untuk melihat keterlambatan respon vegetasi (*lag* 0–6 tahun)
- Regresi linear sederhana untuk mengukur besarnya pengaruh jumlah pengunjung terhadap vegetasi

Pengolahan data spasial dilakukan menggunakan Google Earth Engine, sedangkan analisis statistik dilakukan menggunakan IBM SPSS Statistics.

2.5 Hasil dan Pembahasan

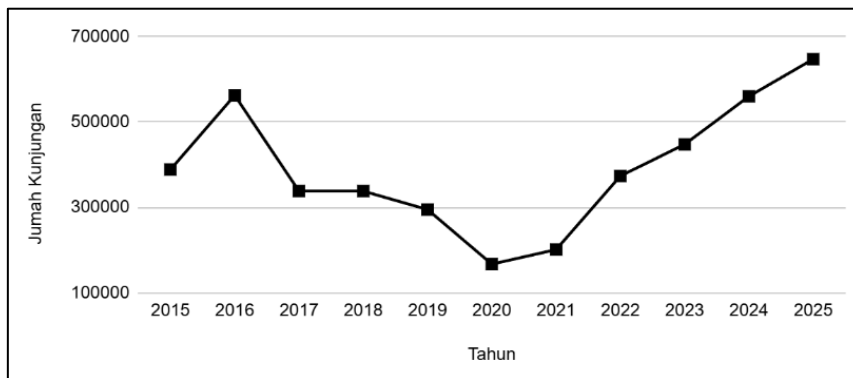
2.5.1 Dinamika Vegetasi Terhadap Jumlah Kunjungan



Gambar 2. Peta Kerapatan Vegetasi Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda, Provinsi Jawa Barat.

Tabel 2. Luasan Lahan Menurut Klasifikasi NDVI (ha)

Tahun	Lahan Tak Bervegetasi	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	TOTAL
2015	0,000	0,001	0,016	0,650	602,612	603,279
2016	0,000	0,017	0,000	0,001	603,262	603,280
2017	0,000	0,272	0,035	0,304	602,668	603,280
2018	0,000	0,001	0,016	0,183	603,080	603,280
2019	0,000	0,038	0,470	1,299	601,473	603,280
2020	0,003	0,026	0,329	0,606	602,315	603,280
2021	0,001	0,004	0,322	0,585	602,368	603,280
2022	0,003	0,422	2,301	17,024	583,444	603,194
2023	0,000	0,494	2,555	18,413	581,818	603,280
2024	0,000	0,451	1,652	9,363	591,814	603,280
2025	0,000	0,464	1,856	11,318	589,640	603,279

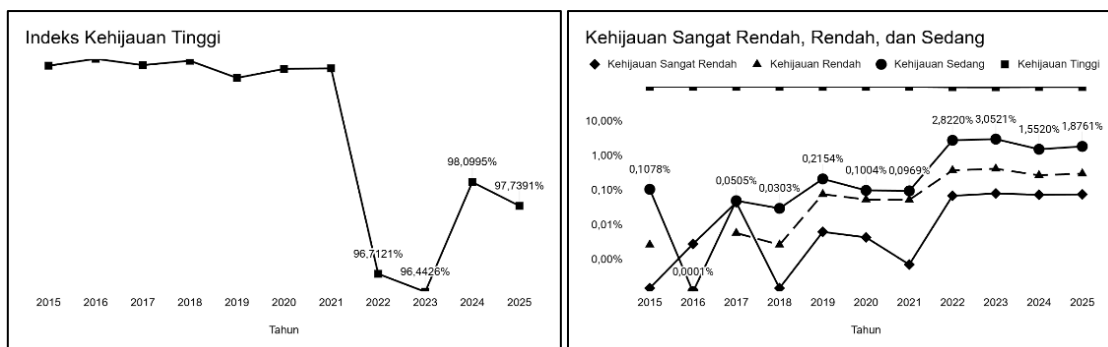


Gambar 3. Tren Pengunjung Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda, Provinsi Jawa Barat.

Tabel 3. Jumlah Pengunjung Taman Hutan Raya Ir. H Djuanda, Provinsi Jawa Barat.

Tahun	Jumlah Kunjungan
2015	388.436
2016	562.189
2017	338.096
2018	338.033
2019	294.946
2020	167.183
2021	201.251
2022	373.448
2023	447.488

Tahun	Jumlah Kunjungan
2024	559.836
2025	646.989



Gambar 4. Tren Indeks Vegetasi di Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda, Provinsi Jawa Barat.

Berdasarkan hasil pengolahan citra (**Tabel 2**), diperoleh bahwa kelas kehijauan tinggi secara konsisten mendominasi luas area setiap tahunnya dengan rata-rata lebih dari 5,9 juta m² dari total luas kawasan ±6,03 juta m². Dominasi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar area konservasi masih berada dalam kondisi vegetatif yang baik (**Gambar 2**). Namun, terjadi kecenderungan penurunan vegetasi pada periode dengan peningkatan jumlah pengunjung (**Gambar 3**), meskipun pada beberapa tahun tertentu terlihat adanya pemulihan vegetasi pada tahun 2023 (**Gambar 4**) yang diasumsikan akibat penurunan jumlah kunjungan pada masa pandemi COVID-19 tahun 2020 (**Tabel 3**). Dinamika fluktuatif tetap terjadi pada kelas-kelas kehijauan rendah hingga sedang, yang merepresentasikan area yang sensitif terhadap perubahan lingkungan dan aktivitas antropogenik.

2.5.2 Analisis Korelasi Lag dan Analisis Regresi

Analisis hubungan antara jumlah pengunjung dan luas vegetasi tinggi dilakukan menggunakan uji korelasi Pearson dan analisis regresi linear sederhana. Uji Pearson digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara kedua variabel, dengan nilai koefisien korelasi (r) berkisar antara -1 hingga +1. Nilai positif menunjukkan hubungan searah, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan berlawanan. Selain itu, dilakukan uji signifikansi menggunakan nilai *p-value* untuk menentukan apakah hubungan yang ditemukan signifikan secara statistik. Dalam penelitian ini, tingkat signifikansi yang digunakan adalah $\alpha = 0,05$.

Untuk mengidentifikasi adanya efek tertunda (*delayed effect*), digunakan pendekatan *lagged correlation* dengan menggeser data deret waktu (*time-series shifting*). Variabel jumlah pengunjung digeser ke depan (*forward shift*) terhadap variabel vegetasi dengan interval *lag* 0 hingga 6 tahun. *Lag* 0 menunjukkan hubungan pada tahun yang sama, sedangkan *lag* 1 hingga *lag* 6 menunjukkan hubungan antara jumlah pengunjung pada tahun sebelumnya dengan kondisi vegetasi pada tahun berikutnya.

Proses pembentukan variabel *lag* dilakukan menggunakan fitur *Create Time Series* pada perangkat lunak IBM SPSS Statistics, sehingga dihasilkan variabel baru (misalnya *Lag_1*, *Lag_2*, hingga *Lag_6*) yang merepresentasikan jumlah pengunjung pada periode sebelumnya (**Tabel 4**). Selanjutnya, masing-masing variabel *lag* diuji korelasinya terhadap luas vegetasi tinggi untuk mengidentifikasi waktu keterlambatan respon vegetasi terhadap tekanan antropogenik.

Tabel 4. Hasil Pergeseran Data Jumlah Kunjungan

Tahun	Jumlah Pengunjung	Luas Kerapatan Vegetasi Tinggi	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag..(n)	Lag 6
2015	388436	6.026.120.000	-	-	-		-
2016	562189	6.032.620.000	388436.00	-	-		-
2017	338096	6.026.680.000	562189.00	388436.00	-		-
2018	338033	6.030.800.000	338096.00	562189.00	388436.00		-
2019	294946	6.014.730.000	338033.00	338096.00	562189.00		-
2020	167183	6.023.150.000	294946.00	338033.00	338096.00	.. (n)	-
2021	201251	6.023.680.000	167183.00	294946.00	338033.00		388436.00
2022	373448	5.834.440.000	201251.00	167183.00	294946.00		562189.00
2023	447488	5.818.180.000	373448.00	201251.00	167183.00		338096.00
2024	559836	5.918.140.000	447488.00	373448.00	201251.00		338033.00
2025	646989	5.896.400.000	559836.00	447488.00	373448.00		294946.00

Tabel 5. Hasil Uji Korelasi antara Jumlah Pengunjung dan Luas Kerapatan Vegetasi Tinggi (2015–2025)

Lag time	Spearman's ρ	Arah Hubungan	p-value	N	Interpretasi
0 tahun	-0,018	Negatif lemah	0,960	10	Tidak signifikan
1 tahun	-0,183	Negatif sedang	0,637	9	Awal efek antropogenik
2 tahun	-0,524	Negatif kuat	0,183	8	Efek mulai terlihat
3 tahun	-0,714	Negatif kuat	0,071	7	Puncak degradasi vegetasi
4 tahun	-0,771	Negatif kuat	0,072	6	<i>Delayed effect</i> masih bertahan
5 tahun	-0,300	Negatif lemah	0,624	5	Efek mulai hilang
6 tahun	+0,400	Positif lemah	0,600	4	Pemulihan vegetasi alami

Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa hubungan antara jumlah pengunjung dan luas vegetasi tidak muncul secara langsung pada tahun yang sama (lag 0). Hubungan mulai terlihat pada lag ke-2 dan puncaknya pada lag ke-3 dengan nilai koefisien korelasi sebesar -0,714, yang menunjukkan hubungan negatif dengan kekuatan moderat (**Tabel 5**) sementara pada lag ke-4 mulai menunjukkan pelemahan.

Selain itu, dilakukan analisis regresi linear sederhana pada lag 1 hingga lag 4 untuk mengukur besarnya pengaruh jumlah pengunjung terhadap perubahan vegetasi. Model regresi digunakan untuk menghitung koefisien determinasi (R^2) dan menguji signifikansi hubungan melalui uji F dan nilai p-value. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan IBM SPSS Statistics, sedangkan pengolahan data spasial dilakukan menggunakan Google Earth Engine.

Tabel 6. Hasil Uji Regresi NDVI terhadap Jumlah Pengunjung (Lag 0–6)

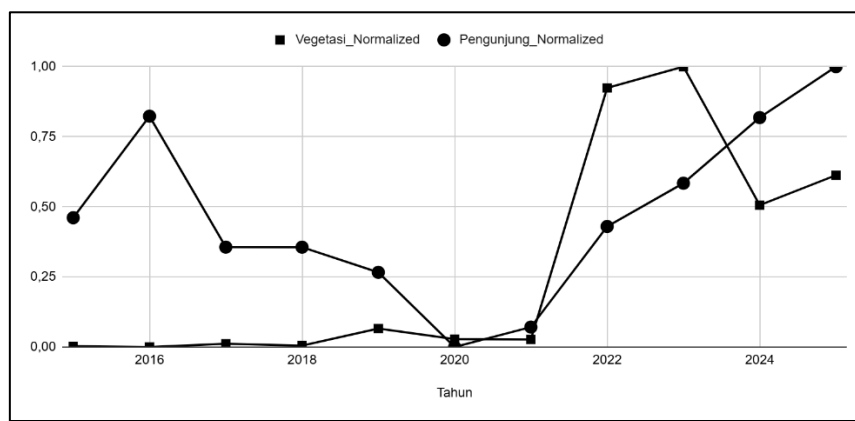
Lag time	R^2	β (JP)	Sig. (Model)	Interpretasi
0 tahun	0.134	-0.34	0.818	Model tidak signifikan
1 tahun	0.296	-0.53	0.591	Awal efek antropogenik
2 tahun	0.346	-0.68	0.597	NDVI menurun setelah 2 tahun
3 tahun	0.680	-0.80	0.275	<i>Delayed effect</i> maksimum
4 tahun	0.662	-0.66	0.461	Efek masih bertahan
5 tahun	0.303	-1.62	0.921	Efek melemah
6 tahun	1.000	+2.37	—	<i>Overfit</i> , tidak valid

Hasil analisis regresi pada lag ke-3 menunjukkan bahwa jumlah pengunjung mampu menjelaskan sebesar 68% variasi luas vegetasi tinggi ($R^2 = 0,680$). Nilai signifikansi sebesar 0,275 menunjukkan bahwa model mendekati signifikan, namun belum memenuhi batas signifikansi statistik konvensional (**Tabel 6**). Hasil ini sejalan dengan analisis korelasi Spearman yang menunjukkan hubungan negatif

dengan kekuatan moderat pada lag ke-3 ($\rho = -0,714$), yang mengindikasikan adanya hubungan antara tekanan pengunjung dan penurunan vegetasi.

Secara keseluruhan, pola hubungan yang tidak muncul pada lag awal (lag 0–2) namun mulai terlihat pada lag ke-3 menunjukkan adanya efek tertunda (*delayed effect*) akibat aktivitas wisata. Hal ini mengindikasikan bahwa dampak aktivitas wisata terhadap vegetasi tidak terjadi secara langsung, melainkan muncul setelah periode waktu tertentu sebagai akibat akumulasi tekanan antropogenik.

Namun demikian, jumlah observasi yang relatif terbatas ($n \approx 10$) menjadi salah satu keterbatasan utama penelitian ini dan berpengaruh terhadap tingkat signifikansi statistik yang diperoleh. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan dalam konteks signifikansi ekologis dibandingkan signifikansi statistik semata. Selain itu, meskipun hubungan terkuat muncul pada lag yang lebih tinggi, penelitian ini menekankan lag ke-3 sebagai model utama karena jumlah data yang lebih besar dan hasil yang lebih stabil secara statistik. Sebagai pendukung tambahan dalam menjelaskan pola keterlambatan respon vegetasi maka disajikan seperti pada **Gambar 5** yang memvisualisasikan deret waktu (*time-series*) antara NDVI dan jumlah pengunjung untuk memperkuat interpretasi ini.



Gambar 5. Tren Jumlah Kunjungan (*Normalized*) dan Luasan Vegetasi Kelas Tinggi (*Normalized*)

Tabel 7. Hasil Normalisasi Data Agregat (2015–2025)

Tahun	Vegetasi Normalized	Pengunjung Normalized
2015	0,002798794261	0,4611301234
2016	0	0,8232619017
2017	0,01155950146	0,3562127193
2018	0,00492371526	0,3560814162
2019	0,06587536208	0,2662805384
2020	0,02800909411	0
2021	0,02686069027	0,07100369733
2022	0,9242093861	0,4298924982
2023	1	0,5842048661
2024	0,5060302391	0,8183578363
2025	0,6127500828	1

Normalisasi data agregat dilakukan untuk mengubah seluruh nilai data ke dalam rentang 0 hingga 1, sehingga perbandingan langsung antara variabel dengan skala yang berbeda dapat dilakukan tanpa menyebabkan distorsi matematis. Hasil normalisasi (**Tabel 7**) menunjukkan bahwa nilai 1 menandakan titik maksimum sepanjang periode observasi (kondisi paling tinggi dari suatu variabel), sedangkan nilai 0 merepresentasikan kondisi terendah (kondisi paling menurun atau terdegradasi).

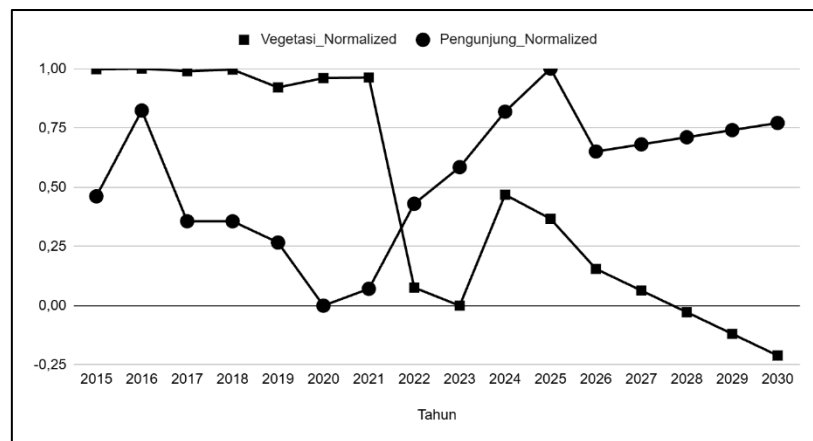
Berdasarkan hasil normalisasi data agregat antara jumlah kunjungan wisata dan luasan vegetasi tinggi, diperoleh pola temporal yang menunjukkan adanya keterkaitan yang bersifat tertunda (*delayed effect*). Nilai *normalized* pada variabel jumlah pengunjung mencapai angka 0 pada kunjungan wisata tahun 2020, sedangkan nilai *normalized* pada variabel luasan vegetasi baru mencapai angka 1 dengan selisih waktu sekitar tiga tahun setelahnya atau tahun 2023. Hal ini mengindikasikan adanya jeda waktu

(*ecological lag*) dimana dampak tekanan antropogenik terhadap vegetasi baru muncul setelah periode akumulasi stres ekologis selama kurang lebih tiga tahun.

2.5.4 Pembahasan dan Implikasi

Temuan penelitian ini menunjukkan adanya *delayed effect*, di mana vegetasi merespons tekanan antropogenik setelah beberapa tahun. Pola ini menunjukkan bahwa ekosistem memiliki kemampuan resiliensi dalam jangka pendek, namun dapat mengalami penurunan apabila tekanan berlangsung secara terus-menerus. Implikasi dari hasil ini adalah perlunya pengelolaan jumlah pengunjung secara lebih adaptif, dengan mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap kondisi vegetasi. Selain itu, hasil ini juga menunjukkan pentingnya penggunaan analisis berbasis waktu (*time-series*) dalam evaluasi kondisi ekosistem hutan kota.

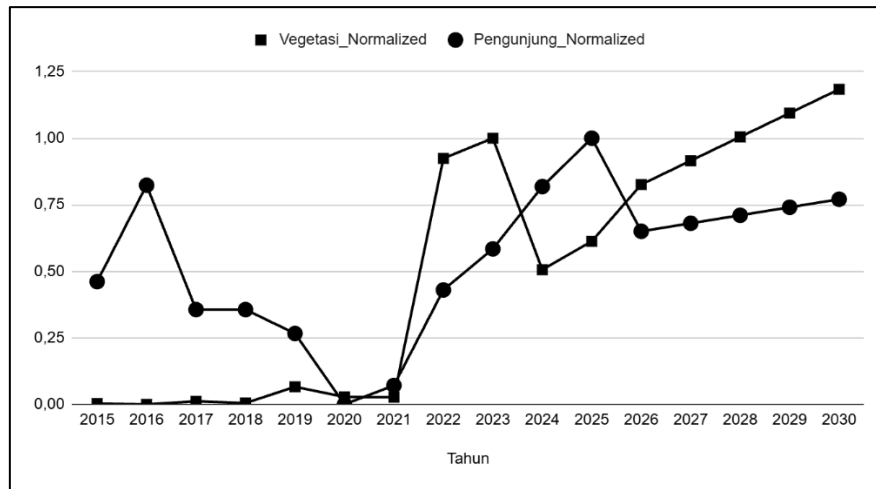
Hasil normalisasi selanjutnya digunakan dalam analisis *forecasting* (peramalan) untuk memproyeksikan tren pertumbuhan kedua variabel hingga tahun 2030. Metode yang digunakan mengacu pada model regresi polinomial derajat kedua (*second-order polynomial regression*), yang dipilih karena mampu menggambarkan perubahan pola naik-turun yang tidak linear pada sistem ekologis. Hasil *forecasting* (**Gambar 6**) menunjukkan bahwa tren jumlah pengunjung cenderung meningkat secara berkelanjutan hingga tahun 2030, dengan potensi mencapai puncak baru yang melampaui periode pra-pandemi. Sebaliknya, garis proyeksi vegetasi tinggi menunjukkan kecenderungan menurun setelah tahun 2025 dan melewati batas garis 0,0 pada rentang tahun 2027–2028.



Gambar 6. Proyeksi Dinamika Vegetasi Kelas Tinggi dan Jumlah Kunjungan

Secara matematis, kondisi $x' = 0$ pada hasil normalisasi menandakan bahwa nilai aktual vegetasi telah mencapai titik minimum ekologis sepanjang periode analisis. Artinya, jika tren ini berlanjut tanpa intervensi, maka pada tahun 2027–2028 luasan vegetasi tinggi diperkirakan turun di bawah ambang batas keseimbangan ekologis, dan kawasan tersebut akan mengalami pergeseran kelas vegetasi dari kategori tinggi menjadi kategori sedang.

Kecenderungan ini juga diperkuat oleh hasil *forecasting* pada grafik vegetasi sedang (**Gambar 7**), dimana garis proyeksi menembus nilai 1,0 pada periode yang sama (pertengahan 2027–2028). Kondisi ini secara ekologis menggambarkan bahwa vegetasi sedang akan meluas karena terjadi *class transition* dari vegetasi tinggi yang mengalami degradasi. Dengan kata lain, penurunan kelas vegetasi tinggi berbanding lurus dengan ekspansi vegetasi sedang akibat tekanan kumulatif dari aktivitas wisata yang meningkat.



Gambar 7. Proyeksi Dinamika Vegetasi Kelas Sedang dan Jumlah Kunjungan

Temuan ini memberikan dasar penting bagi perencanaan pengelolaan kawasan konservasi berbasis waktu (*temporal-based management*). Tahun 2027–2028 dapat diidentifikasi sebagai titik kritis ekologis (*ecological tipping point*) yang perlu diantisipasi melalui kebijakan pembatasan jumlah kunjungan tahunan. Jika tidak dilakukan pengendalian intensitas wisata, maka penurunan kualitas vegetasi diperkirakan akan berlanjut hingga melewati ambang minimum yang dapat dipulihkan secara alami.

Selisih waktu sekitar tiga tahun antara puncak aktivitas wisata dan penurunan vegetasi menggambarkan fase akumulasi stres ekologis, yang kemudian diikuti oleh fase penurunan yang cepat (*decline phase*). Berdasarkan model proyeksi hingga 2030, jika tren peningkatan wisata berlanjut tanpa pengaturan, maka nilai vegetasi hijau akan turun di bawah titik degradasi ($V < 0$) pada pertengahan 2027–2028, dan berpotensi menimbulkan pergeseran kelas vegetasi tinggi menjadi vegetasi sedang.

Langkah akhir dari penelitian ini adalah menentukan ambang batas optimal jumlah kunjungan tahunan (*annual visitor threshold*) berdasarkan model proyeksi, agar garis vegetasi tinggi tetap berada di atas nilai normalisasi 0. Penentuan ambang batas ini akan menjadi dasar dalam perumusan strategi pengendalian kapasitas wisata (*ecological carrying capacity*) yang memastikan keseimbangan antara aktivitas rekreasi dan kelestarian vegetasi.

Untuk memahami batas kemampuan ekosistem dalam menahan tekanan wisata, dilakukan pemodelan regresi linear sederhana antara jumlah pengunjung dan nilai *vegetasi normalized* berdasarkan data periode 2015–2030. Hasil model menunjukkan hubungan negatif yang kuat, dengan **Persamaan 2**,

$$V = 1.1007 - 1.6692P \quad (2)$$

Dimana (V = nilai vegetasi hijau dalam skala normalisasi) dan (P = nilai jumlah pengunjung dalam skala normalisasi). Koefisien negatif menandakan bahwa setiap peningkatan aktivitas wisata berkontribusi langsung pada penurunan kualitas vegetasi. Dengan mensubstitusikan $V = 0$ (batas degradasi ekologis), diperoleh nilai $P = 0.6599$ pada skala normalisasi. Ketika nilai ini dikonversikan kembali ke satuan aktual menggunakan formula *min-max scaling*, diperoleh:

$$P \text{ aktual} = 167,183 + 0.6599 \times (646,989 - 167,183) = 659,927 \quad (3)$$

Hasilnya, ambang batas kunjungan tahunan (*visitor threshold*) yang dapat ditoleransi tanpa menyebabkan penurunan kelas vegetasi adalah ± 659.927 pengunjung per tahun (**Persamaan 3**), setara dengan $\pm 54,994$ pengunjung perbulan; atau ± 1.833 pengunjung perharinya. Angka ini merupakan batas maksimum yang masih dapat diterima tanpa menyebabkan penurunan signifikan pada indeks vegetasi tinggi. Jika jumlah pengunjung tahunan melebihi batas ini secara berturut-turut selama dua hingga tiga tahun, maka sistem vegetasi akan memasuki fase ketidakseimbangan yang sulit dipulihkan secara alami. Ketika nilai vegetasi *normalized* mendekati 0.25, maka mekanisme pembatasan kunjungan perlu segera diterapkan sebagai fase peringatan dini (*early warning stage*).

Secara ekologis, nilai vegetasi *normalized* = 0 merepresentasikan titik kritis dimana vegetasi tinggi telah kehilangan sebagian besar fungsi ekologis utamanya, termasuk penyerapan karbon, peneduhan,

dan pengaturan iklim. Ketika jumlah kunjungan melampaui batas tersebut, sistem vegetasi tidak lagi mampu melakukan regenerasi alami dengan kecepatan yang seimbang terhadap tingkat gangguan.

3. Kesimpulan dan Rekomendasi

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dinamika vegetasi di kawasan konservasi perkotaan tidak hanya dipengaruhi oleh faktor iklim, tetapi lebih kuat dikendalikan oleh aktivitas antropogenik yang terjadi secara berulang dan berskala masif. Berdasarkan analisis deret waktu terhadap data jumlah pengunjung dan nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) selama periode 2015–2025, ditemukan bahwa hubungan antara jumlah pengunjung dan NDVI bersifat negatif kuat pada jeda waktu (*lag time*) dua hingga empat tahun. Hal ini menandakan adanya dampak ekologis tertunda (*delayed anthropogenic impact*) dari peningkatan aktivitas wisata terhadap luasan vegetasi dengan kerapatan tinggi. Model regresi terbaik terdapat pada *lag* tiga tahun dengan nilai R^2 sebesar 0.680 dan koefisien $\beta_{JP} -0.80$, yang mengindikasikan bahwa sekitar 68% variasi NDVI tiga tahun kemudian dapat dijelaskan oleh variabel jumlah pengunjung, dengan kontribusi terbesar berasal dari tekanan wisata.

Tekanan antropogenik memiliki pengaruh jangka menengah yang kuat, dengan efek penurunan vegetasi yang muncul dua hingga tiga tahun setelah peningkatan aktivitas wisata dan bertahan hingga empat tahun sebelum proses pemulihan alami vegetasi mulai terjadi. Hasil ini memperkuat teori *Human–Environment Interaction* dan *Delayed Ecological Response* yang menjelaskan bahwa gangguan ekologis akibat aktivitas manusia tidak selalu langsung terlihat, tetapi muncul secara bertahap seiring waktu. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa aktivitas manusia merupakan salah satu faktor perubahan vegetasi dengan indeks tinggi di kawasan konservasi perkotaan. Fenomena penurunan NDVI dengan *delayed effect* memperlihatkan bahwa dampak antropogenik tidak hanya bersifat langsung, tetapi juga kumulatif, sehingga diperlukan strategi pengelolaan yang memperhitungkan periode waktu pemulihan ekologis (*ecological recovery window*).

Berdasarkan hasil analisis kuantitatif dan proyeksi hingga tahun 2030, diperoleh bahwa jumlah pengunjung maksimum yang masih dapat ditoleransi oleh ekosistem vegetasi tinggi di Tahura Ir. H. Djuanda tanpa melampaui batas degradasi ekologis adalah 659.927 pengunjung per tahun. Nilai ini menandai batas atas kapasitas ekologis yang perlu dijaga agar sistem vegetasi tidak mengalami penurunan kelas ke vegetasi sedang pada periode kritis 2027–2028. Maka disarankan agar pengelola kawasan menetapkan kebijakan pembatasan kunjungan berbasis daya dukung ekologis dengan menerapkan sistem kuota tahunan yang adaptif. Kebijakan ini dapat diintegrasikan ke dalam mekanisme perizinan kunjungan berbasis data spasial dan waktu, dimana jumlah pengunjung harian dan bulanan disesuaikan dengan kondisi vegetasi. Selain itu, perlu dikembangkan sistem pemantauan vegetasi berbasis NDVI secara periodik untuk mendeteksi lebih dini perubahan vegetasi dan mengevaluasi efektivitas program konservasi. Strategi adaptif seperti penutupan temporer area wisata, pembentukan zona pemulihan vegetasi, dan integrasi data spasial ke dalam sistem pengambilan keputusan dapat membantu menjaga keberlanjutan fungsi ekologis kawasan.

Dari sisi akademik, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap penguatan teori *delayed anthropogenic impact* pada ekosistem konservasi tropis. Namun, keterbatasan penelitian ini terletak pada resolusi temporal data NDVI tahunan dan jumlah observasi yang relatif sedikit, sehingga pengaruh jangka pendek (*intra-annual*) belum sepenuhnya terdeteksi. Berdasarkan hasil uji korelasi Spearman, hubungan antara jumlah pengunjung dan NDVI menunjukkan pola negatif kuat pada jeda waktu dua hingga empat tahun ($p = -0,595$ hingga $-0,771$) dengan nilai p -value mendekati signifikan ($p \approx 0,072$). Meskipun belum signifikan secara statistik, pola hubungan yang konsisten ini menunjukkan signifikansi ekologis yang kuat, mencerminkan adanya efek *delayed ecological response* akibat tekanan wisata terhadap vegetasi. Ketidaksignifikanan statistik diduga disebabkan oleh keterbatasan jumlah observasi tahunan ($n=10$), sehingga hasil ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai *ecologically meaningful correlation* daripada *statistically significant correlation*. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data dengan resolusi temporal yang lebih tinggi, seperti MODIS atau Sentinel-2, serta mengintegrasikan variabel sosial-ekologis lain seperti indeks kenyamanan termal, kepadatan vegetasi spesifik jenis, dan aktivitas pembangunan fisik secara spasial. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang dinamika vegetasi di kawasan konservasi perkotaan dan memperkuat dasar ilmiah bagi kebijakan konservasi adaptif yang berkelanjutan.

Kebijakan Penggunaan Generative Artificial Intelligence (AI)

Penggunaan Generative Artificial Intelligence (AI) dalam penelitian ini hanya terbatas sebagai alat bantu dalam menemukan referensi yang relevan dalam penelitian. AI tidak digunakan dalam perumusan ide penelitian, pengolahan data, analisis, maupun penarikan kesimpulan.

Penulis menggunakan ChatGPT (OpenAI) untuk membantu perbaikan bahasa dan struktur kalimat. Seluruh isi, analisis, dan hasil penelitian sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

Referensi

- [1] J. B. Patel and Z. Raval, "The Impacts of Urbanization on Ecological Systems: A Comprehensive Study of the Complex Challenges Arising from Rapid Urban Growth," *Research Review Journal of Indian Knowledge Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, Jun. 2024, <https://doi.org/10.31305/rrijks.2024.v1.n1.001>.
- [2] X. Bai *et al.*, "Linking Urbanization and the Environment: Conceptual and Empirical Advances," 2017, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ>.
- [3] B. L. T. Li, E. F. Lambin, and A. Reenberg, "The emergence of land change science for global environmental change and sustainability," 2007. [Online]. Available: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0704119104
- [4] I. A. Abdul Samad, Z. M. Baharuddin, and H. H. Md Jani, "Evaluation of Ecosystem Services Contributions on Urban Forests in Kuala Lumpur," *Journal of Architecture, Planning and Construction Management*, vol. 14, no. 1, Jun. 2024, <https://doi.org/10.31436/japcm.v14i1.697>.
- [5] A. Paula Branco do Nascimento, S. Rosana dos Santos, G. Gaudereto, and A. Lucia Casteli Figueiredo Gallardo, "Gerenciamento de Cidades Os serviços ecossistêmicos de espaços verdes urbanos: contribuições para a Agenda 2030."
- [6] A. Karimi, P. Pahlavani, and B. Bigdeli, "Land use analysis on land surface temperature in urban areas using a geographically weighted regression and Landsat 8 imagery, a case study: Tehran, Iran," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Sep. 2017, pp. 117–122. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-117-2017>.
- [7] Kintan Annisa and Weishaguna, "Kajian Kualitas Hutan Kota di Kota Bandung," *Jurnal Riset Perencanaan Wilayah dan Kota*, pp. 1–8, Jul. 2023, <https://doi.org/10.29313/jrpk.v3i1.1805>.
- [8] M. Ibrahim Miftahulhuda *et al.*, "Estimasi Stok Karbon Taman Hutan Raya Ir H. Djuanda."
- [9] S. T. A. Pickett and M. L. Cadenasso, "Advancing urban ecological studies: Frameworks, concepts, and results from the Baltimore Ecosystem Study," in *Austral Ecology*, Apr. 2006, pp. 114–125. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2006.01586.x>.
- [10] C. Afrianti *et al.*, "An Assessment of Urban Forest Landscape Services for Green Space Management Improvement in Bandung City, West Java, Indonesia," in *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249404006>.
- [11] M. Effendi, Nurhayati, and H. S. Arifin, "Strategi Pengelolaan Lanskap Wisata di Perkampungan Budaya Betawi Setu Babakan Jakarta," *Jurnal Lanskap Indonesia*, vol. 16, no. 1, pp. 84–98, Apr. 2024, <https://doi.org/10.29244/jli.v16i1.48700>.
- [12] S. Fahmi *et al.*, "Comparison of Vegetation Canopy Density Mapping in Djuanda Great Forest Park Using FCD And MSARVI Transformation Based on Sentinel-2A Image," Cetak, 2025.
- [13] S. A. Shirazi and J. H. Kazmi, "Analysis of socio-environmental impacts of the loss of urban trees and vegetation in Lahore, Pakistan: a review of public perception," Dec. 01, 2016, *Springer Verlag*. <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0050-8>.
- [14] U. States, "FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure," 1995.
- [15] A. Moh Rifiyan Arief Program Studi Pariwisata Jurusan Ilmu Administrasi, "Pengembangan Aktivitas Wisata Di Taman Hutan Raya Ir. H. Djuanda Bandung Jawa Barat."
- [16] Compton J. Tucker, "Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation," 1978. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- [17] C. Neumann, R. Behling, and G. Weiss, "Biodiversity Change in Cultural Landscapes—The Rural Hotspot Hypothesis," *Ecol. Evol.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2025, <https://doi.org/10.1002/ece3.70811>.

- [18] P. Katila, C. J. P. Colfer, W. de Jong, G. Galloway, P. Pacheco, and G. Winkel, *Towards SDG 11: How Urban Greenery Can Help Us Build Sustainable Cities*. Cambridge University Press, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781108765015>.
- [19] A. Azmeer, F. Tahir, and S. G. Al-Ghamdi, "Towards SDG 11: How Urban Greenery Can Help Us Build Sustainable Cities," *Front. Young Minds*, vol. 12, Nov. 2024, <https://doi.org/10.3389/frym.2024.1419477>.
- [20] J. F. Dashiell, "Mcgraw-Hill Pustlcatlons In Psychology Fundamental Statistics in Psychology and Education."
- [21] S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, and G. Shao, "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing," *J. For. Res. (Harbin)*., vol. 32, no. 1, pp. 1–6, Feb. 2021, <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
- [22] S. W. Andini, Y. Prasetyo, and A. Sukmono, "Analisis Sebaran Vegetasi Dengan Citra Satelit Sentinel Menggunakan Metode NDVI dan Segmentasi," 2018.