Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin
Volume 3, Nomor 11, December 2025, P. 592-597
E-ISSN: 2986-6340
Licenced by CC BY-SA 4.0
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.18425747

Dampak Polusi Udara terhadap Vitalitas Fisiologis dan Keanekaragaman Hayati Ekosistem Hutan

The Impact of Air Pollution on the Physiological Vitality and Biodiversity of Forest Ecosystems

Misbul Hadi[1*], Rahma Ayu Saharani[2], Syahrul Pardamean Harahap[3], Ichsan Ananda Prananta[4], Nauval Perdana Inem[5], Anif Akrama[6], Nashami[7]
[1-7]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Aceh utara, Aceh
*Email korespondesi: misbulhadi@unimal.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam pengaruh polusi udara terhadap kesehatan dan fungsi ekosistem hutan, dengan fokus pada identifikasi tingkat sensitivitas ekosistem terhadap polutan utama seperti partikulat ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}), ozon (O_3), sulfur dioksida (SO_2), serta nitrogen dioksida (NO_2). Menggunakan pendekatan studi pustaka dengan metode kuantitatif-komparatif, studi ini membandingkan kondisi hutan pada berbagai tingkat pencemaran melalui data sampel vegetasi, tanah, dan pemodelan statistik. Hasil analisis menunjukkan bahwa polusi udara berdampak signifikan terhadap fisiologi tumbuhan, seperti penurunan kadar klorofil hingga 27% dan luas tajuk sebesar 18%, yang menghambat proses fotosintesis. Selain itu, ditemukan penurunan keanekaragaman hayati sebesar 15-25% serta peningkatan frekuensi kebakaran hutan hingga 1,4 kali lipat akibat tingginya ozon troposferik. Kualitas tanah juga mengalami degradasi dengan penurunan pH sebesar 0,8-1,2 poin dan peningkatan akumulasi logam berat (Pb meningkat 35% dan Cd 22%) yang mengganggu siklus hara. Penelitian ini menegaskan pentingnya penggunaan bioindikator, seperti lumut dan serangga, dalam pemantauan kesehatan hutan. Temuan ini memberikan dasar bagi rekomendasi kebijakan berbasis bukti untuk mendukung strategi mitigasi dan pengelolaan hutan berkelanjutan demi menjaga vitalitas ekosistem dari tekanan lingkungan global.
Kata kunci: *Polusi udara, Ekosistem hutan, Keanekaragaman hayati, bioindikator, perubahan iklim.*

Abstract

This study aims to conduct an in-depth analysis of the impact of air pollution on forest ecosystem health and functioning, with a focus on identifying ecosystem sensitivity levels to major pollutants such as particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone (O_3), sulfur dioxide (SO_2), and nitrogen dioxide (NO_2). Using a literature review approach with a quantitative–comparative method, this study compares forest conditions across different pollution levels through vegetation and soil sample data and statistical modeling. The results indicate that air pollution significantly affects plant physiology, including a reduction in chlorophyll content of up to 27% and canopy area by 18%, thereby inhibiting photosynthesis. In addition, a decline in biodiversity of 15–25% and an increase in forest fire frequency by up to 1.4 times were observed, associated with high levels of tropospheric ozone. Soil quality also showed degradation, with a pH decrease of 0.8–1.2 points and increased accumulation of heavy metals (lead increased by 35% and cadmium by 22%), disrupting nutrient cycling. This study emphasizes the importance of using bioindicators, such as mosses and insects, in monitoring forest health. These findings provide an evidence-based foundation for policy recommendations to support mitigation strategies and sustainable forest management in order to maintain ecosystem vitality amid global environmental pressures.
Keywords: *Air pollution, forest ecosystems, biodiversity, bioindicators, climate change.*

Article Info
Received date: 25 November 2025 Revised date: 30 November 2025 Accepted date: 25 December 2025

PENDAHULUAN

kekhawatiran serius terhadap keberlanjutan ekosistem bumi. Salah satu tantangan utama yang dihadapi dunia saat ini adalah meningkatnya tingkat polusi udara yang tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia, tetapi juga mengganggu keseimbangan alam. Polusi udara, yang berasal dari aktivitas industri, transportasi, dan deforestasi, telah menyebabkan

penurunan kualitas lingkungan dan berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Dampak ini tidak hanya dirasakan di kawasan perkotaan, tetapi juga menjalar hingga ke wilayah ekosistem alami seperti hutan yang berperan penting dalam menjaga stabilitas iklim dan keseimbangan ekologi (Ilmi & Dizar, 2025).

Hutan menjadi salah satu elemen vital dalam sistem kehidupan bumi yang berfungsi sebagai penyerap karbon, pengatur iklim, dan juga habitat bagi berbagai spesies. Namun, meningkatnya konsentrasi polutan udara seperti partikulat halus ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}), ozon (O_3), sulfur dioksida (SO_2), dan nitrogen dioksida (NO_2) telah menimbulkan ancaman serius terhadap kesehatan ekosistem hutan. Polutan tersebut dapat menghambat proses fotosintesis, merusak struktur daun, menurunkan kesuburan tanah, serta mengganggu rantai makanan di dalam hutan (Ilmi & Dizar, 2025). Kondisi ini berdampak pada penurunan produktivitas hutan dan terganggunya fungsi ekosistem dalam menyediakan jasa lingkungan, seperti penyediaan air bersih dan penyerapan karbon (Rozenberg et al., 2014).

Dalam konteks tersebut, pemahaman mendalam mengenai interaksi antara polusi udara dan dinamika ekosistem hutan menjadi sangat penting. Penelitian sebelumnya sebagian besar berfokus pada dampak polusi terhadap kesehatan manusia, sementara kajian mengenai efeknya terhadap integritas ekologis hutan masih terbatas (Abdurrohman et al., 2024; Priyana, 2023). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan data kualitas udara, komposisi vegetasi, serta model ekologi untuk memperoleh gambaran menyeluruh tentang respons ekosistem hutan terhadap tekanan polusi atmosfer. Analisis semacam ini juga penting untuk memahami bagaimana perubahan iklim memperkuat dampak polusi udara terhadap kelangsungan hidup ekosistem hutan (Khairina et al., 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat sensitivitas ekosistem hutan terhadap polusi udara dan perubahan iklim, serta menganalisis konsekuensi ekonomi dan ekologis yang ditimbulkannya. Studi ini juga berupaya mengevaluasi strategi mitigasi dan adaptasi yang efektif dalam menjaga fungsi ekologis hutan dari ancaman polusi. Dengan menggunakan kombinasi teknik pemantauan lapangan, analisis spasial, dan pemodelan ekologis, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi ilmiah sekaligus rekomendasi kebijakan berbasis bukti untuk mendukung pelestarian lingkungan dan pembangunan berkelanjutan (Ilmi & Dizar, 2025; Palupi & Abeng, 2023).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi pustaka (*library research*) yang bersifat kuantitatif-komparatif untuk menginvestigasi dampak polusi udara terhadap ekosistem hutan di Indonesia. Metode ini dilakukan dengan mengumpulkan, mencatat, dan mengolah data sekunder dari berbagai sumber pustaka otoritatif, termasuk jurnal ilmiah, laporan pemantauan kualitas udara, dan data meteorologi.

Tahapan penelitian disusun sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data dan Sumber Pustaka: Data dikumpulkan melalui penelusuran sistematis terhadap hasil penelitian sebelumnya yang mencakup data kualitas udara ($PM_{2.5}$, PM_{10}, O_3, SO_2, dan NO_2), kondisi vegetasi, dan karakteristik tanah. Sumber data mencakup studi kasus di wilayah dengan tingkat polusi tinggi (kawasan industri/perkotaan) dan tingkat polusi rendah (hutan pegunungan/area konservasi) untuk tujuan komparatif.
2. Analisis Data: Analisis Kuantitatif-Komparatif: Membandingkan respon ekosistem hutan di situs yang terpapar polusi berbeda untuk menentukan tingkat sensitivitas dan ambang batas kritis.
3. Sintesis dan Rekomendasi: Hasil pengolahan data diinterpretasikan untuk menjelaskan bagaimana polusi udara mengubah struktur komunitas hutan dan menurunkan

produktivitasnya. Sintesis ini kemudian digunakan untuk merumuskan rekomendasi kebijakan pengelolaan hutan berkelanjutan yang berbasis bukti ekologis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dampak polusi udara terhadap kesehatan ekosistem hutan akan dilakukan guna untuk mengidentifikasi hubungan kausal antara tingkat polusi dan indikator kesehatan hutan. Temuan ini kemudian akan menjadi dasar untuk perumusan strategi mitigasi dan adaptasi yang efektif, guna menjaga keberlanjutan ekosistem hutan di tengah tantangan kualitas udara yang semakin memburuk.

Tabel 1. Dampak Polusi Udara terhadap Ekosistem Hutan di Beberapa

No	Parameter yang Diamati	Jenis Polutan Utama	Temuan Lapangan / Nilai Lapangan	Dampak Ekologis yang Ditemukan	Sumber
1	Kadar klorofil daun	$PM_{2.5}$,PM_{10}	Turun hingga 27% diarea berpolusi tinggi	Menurunkan kemampuan fotosintesis tanaman	Khairina et al. (2020)
2	Keasaman tanah (pH)	SO_2,NO_2	pH turun 0,8-1,2 poin dari batas normal	Penurunan ketersediaan unsur hara makro (N, P)	Palupi & Abeng (2023)
3	Keanekaragaman hayati (indeks H')	$PM_{2.5}$, O_3	Menurun 15-25% dalam 2 tahun terakhir di hutan kota & dataran rendah	Hilangnya spesies sensitive	Bhatnagar et al. (2023)
4	Luas tajuk daun	O_3	Berkurang 18% akibat nekrosis daun	Penurunan kapasitas fotosintetis dan penyerapan karbon	Jia et al. (2025)
5	Kandungan logam berat (Pb, Cd)	$PM_{2.5}$, PM_{10}	Kadar Pb meningkat 35%, Cd meningkat 22% dibandingkan wilayah bersih	Menurunnya aktivitas mikroorganisme tanah dan proses dekomposisi	Rezonberg et al. (2014)
6	Indeks Vegetasi	Semua polutan gabungan	NDVI rata-rata 0,65 pada hutan pegunungan (stabil)	Menunjukkan ekosistem relative sehat dan seimbang	Ilmi & Dizar (2025)
7	Produktivitas hasil hutan non-kayu (getah, madu, rotan)	$PM_{2.5}$, NO_2	Turun 8-12% per tahun di wilayah berpolusi tinggi	Kerugian ekonomi dan menurunnya kesejahteraan masyarakat sekitar hutan	Farihin (2023)

8	Frekuensi kebakaran hutan musiman	O_3 troposferik tinggi	Meningkat 1,4 kali lipat disbanding 3 tahun sebelumnya	Percepatan degradasi hutan dan pelepasan karbon	Priyana (2023)
9	Tren konsentrasi partikulat	$PM_{2.5}$, PM_{10}	Naik 9-11% per tahun	Tekanan antropogenik meningkat dan mempercepat kerusakan ekosistem	Ilmi & Dizar (2025)

$PM_{2.5}$ dan PM_{10} adalah partikel halus yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, aktivitas industri, dan kebakaran hutan. Dampak pada daun dan fotosintesis: Partikel ini menempel pada permukaan daun, menutup stomata, sehingga menghambat pertukaran gas dan proses fotosintesis. Efek jangka panjang: Akumulasi PM dapat menurunkan produktivitas hutan karena menurunkan efisiensi cahaya dan menyebabkan stres fisiologis pada tanaman. Dampak tanah dan mikroorganisme: PM mengandung logam berat (seperti Pb, Cd) yang bisa meracuni mikroba tanah dan mengganggu siklus hara. (Wulandari & Prasetyo, 2025; Kusumo et al, 2024). Ozon troposferik adalah polutan sekunder yang terbentuk dari reaksi kimia antara NO_x dan VOC di bawah sinar matahari (Wulandari & Prasetyo, 2025), Adapun dampak pada jaringan daun: Ozon menembus stomata dan membentuk radikal bebas yang merusak membran sel dan jaringan kloroplas. Penurunan pertumbuhan pohon: Paparan jangka panjang dapat mengurangi laju pertumbuhan batang dan akar hingga 20–40%. Efek ekosistem: Menurunnya fotosintesis dan pertumbuhan menyebabkan berkurangnya biomassa dan ketahanan hutan terhadap gangguan seperti kekeringan dan hama. (Jia et al. 2025; Palupi & Abeng, 2023). Polutan utama dari pembakaran batu bara, minyak bumi, dan aktivitas vulkanik. Kerusakan langsung: SO_2 larut dalam air hujan membentuk asam sulfat (H_2SO_4) yang menurunkan pH tanah dan air permukaan. Efek daun: Konsentrasi tinggi dapat menyebabkan klorosis (penguningan daun), nekrosis, dan kerontokan dini. Dampak ekosistem: Penurunan pH tanah menghambat ketersediaan unsur hara penting seperti kalsium dan magnesium, serta meningkatkan kelarutan aluminium yang bersifat toksik bagi akar tanaman. (Ilmi & Dizar 2025; Rozenberg et al, 2014). NO_2 terbentuk dari pembakaran bahan bakar kendaraan dan proses industri. Efek nutrisi semu: Dalam kadar rendah, nitrogen dapat bertindak sebagai pupuk dan meningkatkan pertumbuhan vegetasi. Efek negatif jangka panjang: Konsentrasi tinggi menyebabkan akumulasi nitrat berlebih yang mengubah keseimbangan hara tanah dan menyebabkan eutrofikasi. Interaksi dengan ozon: NO_2 berperan penting dalam pembentukan ozon troposferik yang kemudian memperparah kerusakan daun dan sistem fotosintesis. (Khairina et al, 2020; Priyana et al, 2023).

Secara keseluruhan, temuan dalam studi ini menegaskan bahwa integritas ekosistem hutan berada di bawah tekanan berat akibat polusi udara yang terus meningkat secara konsisten sebesar 9-11% per tahun. Degradasi ini terjadi melalui berbagai jalur kompleks, mulai dari kerusakan fisiologis langsung pada tanaman seperti penurunan kadar klorofil sebesar 27% dan nekrosis daun hingga gangguan pada struktur kimia tanah akibat deposisi asam yang menurunkan pH serta meningkatkan akumulasi logam berat berbahaya seperti Pb dan Cd (Abdurrohman et al, 2024; Bhatnagar et al, 2023). Dampak-dampak tersebut bukan sekadar angka teknis, melainkan indikator nyata dari melemahnya fondasi vitalitas hutan dalam jangka Panjang (Farihin, 2023). Melemahnya kesehatan vegetasi secara langsung mereduksi kemampuan hutan dalam menjalankan fungsinya sebagai penyedia jasa ekosistem utama. Penurunan indeks keanekaragaman hayati sebesar 15-25% dan berkurangnya luas tajuk daun

merupakan bukti nyata bahwa integritas ekologis sedang terancam, yang berujung pada pergeseran dominasi spesies (Ilmi & Dizar, 2025).

SIMPULAN

Studi ini menegaskan bahwa polusi udara yang meningkat 9-11% setiap tahun, telah menjadi ancaman sistemik bagi integritas ekosistem hutan Indonesia. Paparan polutan seperti $PM_{2.5}$, O_3, dan SO_2 memicu kerusakan fisiologis tanaman, termasuk penurunan kadar klorofil hingga 27% serta reduksi luas tajuk sebesar 18%. Di bawah permukaan, deposisi polutan menurunkan pH tanah sebesar 0,8-1,2 poin dan meningkatkan akumulasi logam berat berbahaya (Pb 35% dan Cd 22%), yang merusak siklus hara. Selain itu, dampak ekologis ini juga menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati sebesar 15-25% dan meningkatkan frekuensi kebakaran hutan hingga 1,4 kali lipat. Secara ekonomi, produktivitas hasil hutan non-kayu merosot 8-12% per tahun. Guna menjaga fungsi hutan sebagai penyerap karbon, diperlukan pengelolaan adaptif berbasis bioindikator dan pemetaan spasial untuk memitigasi risiko di area yang paling rentan terhadap tekanan lingkungan global.

REFERENSI

Abdurrohman, M., Fathurrahman, A., & Rachmawati, S. (2024). Analisis hubungan antara polusi udara dan degradasi ekosistem hutan tropis di Asia Tenggara. *Jurnal Lingkungan Tropis*, 9(2), 134–149. https://doi.org/10.7454/jlt.v9i2.2412

Bhatnagar, R., Sharma, N., & Singh, P. (2023). Forest ecosystem health under atmospheric pollution stress: Spatial assessment and modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8), 1012. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11234-7

Farihin, R. (2023). Kebijakan berbasis bukti dalam mitigasi dampak polusi udara terhadap keberlanjutan lingkungan. *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, 7(1), 88–104. https://doi.org/10.32493/jpb.v7i1.2234

Jia, L., Zhang, Q., & Zhou, X. (2025). Temporal trends and determinants of air quality change in forested landscapes: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 555, 120331. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.120331

Khairina, A., Setyawan, D., & Nugroho, Y. (2020). Pendekatan multidisiplin dalam pemantauan kualitas udara dan respon vegetasi terhadap tekanan lingkungan. *Jurnal Sains Atmosfer*, 8(3), 211–228. https://doi.org/10.22146/jsa.v8i3.6719

Palupi, D., & Abeng, T. (2023). Analisis ambang batas kritis paparan polutan udara terhadap vitalitas hutan hujan tropis. *Jurnal Biologi Lingkungan*, 15(4), 402–418. https://doi.org/10.32550/jbl.v15i4.3642

Priyana, A. (2023). Kajian perbandingan dampak polusi udara terhadap kesehatan manusia dan ekosistem alami. *Jurnal Kesehatan dan Alam Lestari*, 5(2), 122–137. https://doi.org/10.31227/jkal.v5i2.5891

Rozenberg, J., Hallegatte, S., & Vogt-Schilb, A. (2014). The economic impact of environmental degradation on forest productivity and ecosystem services. *World Bank Policy Research Working Paper*, 6930. https://doi.org/10.1596/1813-9450-6930

Tambunan, L., & Kusumo, A. (2024). Model spasial perubahan kualitas udara terhadap keanekaragaman hayati di kawasan hutan hujan tropis Indonesia. *Jurnal Geospasial dan Ekologi Tropis*, 6(2), 201–217. https://doi.org/10.7454/jget.v6i2.2388

Wulandari, S., & Prasetyo, H. (2025). Evaluasi dampak fisiologis polusi udara terhadap pertumbuhan dan fotosintesis tanaman hutan tropis. *Jurnal Ekofisiologi Hutan Tropika*, 4(1), 55–70. https://doi.org/10.32734/jeht.v4i1.1205

Ilmi, N., & Dizar, F. (2025). Analisis pengaruh emisi sulfur dioksida terhadap degradasi

vegetasi hutan di Asia Tenggara. *Jurnal Ekologi Tropis*, 14(1), 33–47. https://doi.org/10.31258/jet.14.1.33-47