

Research Article



Serangga Epifauna sebagai Bioindikator Pencemaran Tanah pada Lahan Pasca-Tambang Emas: Studi Kasus Gunung Botak, Maluku, Indonesia

(Epifaunal Insects as Bioindicators of Soil Contamination in Post-Gold Mining Landscapes: A Case Study from Gunung Botak, Maluku, Indonesia)

Muhammad Rijal^{1*}, Ain Nadirah Binti Romainor², Salma Samputri³, Abu Bakar Lessy⁴

¹Universitas Islam Negeri A.M. Sangadji Ambon, Ambon, Indonesia

²Universiti Malaysia Sarawak, Sarawak, Malaysia

³Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

⁴Universitas Muhammadiyah Maluku, Ambon, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received : April 3, 2026

Revision in revised from : May 19, 2026;

Accepted : June 21, 2026;

Available Online : September 31, 2026.

KEYWORDS :

Epifaunal insects;

Bioindicator;

Soil contamination;

Heavy metals;

Post-gold mining;

Community composition.

ABSTRACT

Gold mining can leave soils contaminated by heavy metals and alter soil biological communities. This study evaluated epifaunal insects as assemblage-level bioindicators of soil contamination in Gunung Botak, Maluku, Indonesia. Twenty sampling points were distributed across high, medium, low, and reference zones. Insects were collected using pitfall traps and Berlese-Tullgren funnels, while pH, moisture, organic matter, Pb, Cd, and Hg were analyzed using standard soil procedures and ICP-MS. Pb, Cd, and Hg were highest in the high-contamination zone. Total insect abundance was also highest in this zone (405 individuals), mainly due to dominant tolerant taxa. However, Shannon-Wiener diversity (2.01), Simpson index (0.81), and evenness (0.68) were lowest, indicating community homogenization. RDA showed that heavy metals were associated with community shifts, while more neutral pH and higher organic matter supported more diverse communities. Epifaunal insects are useful bioindicators when interpreted through diversity, dominance, and community composition rather than abundance alone.



Copyright (c) 2026 @author(s).

1. PENDAHULUAN

Pencemaran tanah akibat aktivitas pertambangan emas merupakan masalah lingkungan karena logam berat yang tertinggal pada tailing dan tanah permukaan dapat bertahan lama, berpindah ke organisme, dan mengubah fungsi ekosistem tanah. Pb, Cd, dan Hg penting diperhatikan karena bersifat persisten, toksik pada konsentrasi tertentu, serta berpotensi menekan

organisme tanah yang sensitif. Dalam konteks lahan pasca-tambang emas, dampak utama yang relevan dengan penelitian ini adalah perubahan kualitas tanah dan perubahan struktur komunitas biota tanah, termasuk serangga epifauna (Iqbal et al., 2025; Hussein et al., 2025).

Pemantauan kualitas tanah tidak cukup bertumpu pada parameter fisiko-kimia. Konsentrasi logam berat, pH, kelembapan, dan bahan organik

*Corresponding Author

e-mail address : muhammad.rijal@uinambon.ac.id

Published by Center for Ecology, Conservation and Ethnobiology Studies

memang menjelaskan kondisi medium tanah, tetapi parameter tersebut belum langsung menunjukkan respons organisme yang hidup di dalam sistem tersebut. Oleh karena itu, indikator biologis diperlukan untuk menilai apakah kontaminasi telah memengaruhi komunitas, terutama melalui perubahan komposisi takson, keanekaragaman, dominansi, dan pemerataan komunitas (Chowdhury et al., 2023; Ghannem et al., 2024).

Bioindikator dalam penelitian ini dipahami sebagai organisme atau kelompok organisme yang perubahan keberadaan, kelimpahan relatif, komposisi, atau struktur komunitasnya mencerminkan perubahan kondisi lingkungan. Efek toksik pada tingkat komunitas tidak dimaknai sebagai bukti fisiologis langsung pada individu, melainkan sebagai indikasi ekologis yang terlihat melalui penurunan keanekaragaman, peningkatan dominansi takson toleran, dan perubahan komposisi komunitas di sepanjang gradien kontaminasi (Oktariansyah et al., 2025; Priya et al., 2025).

Serangga epifauna relevan digunakan sebagai bioindikator karena hidup dan beraktivitas pada permukaan tanah, bersentuhan langsung dengan substrat tercemar, memiliki siklus hidup relatif cepat, serta berperan dalam dekomposisi dan perputaran bahan organik. Dalam studi ini, istilah serangga epifauna merujuk pada serangga dan artropoda permukaan tanah yang tertangkap melalui pitfall trap dan ekstraksi serasah, antara lain Coleoptera, Hymenoptera, Diptera, Orthoptera, Lepidoptera, serta Collembola sebagai artropoda tanah yang sering dianalisis bersama komunitas mesofauna tanah.

Alasan utama penggunaan serangga epifauna bukan semata-mata karena mudah dikoleksi, melainkan karena karakter biologisnya sensitif terhadap perubahan habitat dan kontaminan tanah. Kemudahan pengambilan sampel, jumlah individu yang relatif memadai, dan kemungkinan analisis komunitas menjadi faktor penunjang yang memperkuat kegunaannya dalam pemantauan lapangan. Respons yang diamati dapat berupa perubahan kelimpahan relatif, pergeseran dominansi, penurunan keanekaragaman, atau bertahannya takson tertentu yang lebih toleran terhadap tekanan lingkungan (Chowdhury et al., 2023; Iqbal et al., 2025).

Kajian sebelumnya menunjukkan bahwa serangga dan artropoda tanah dapat merespons pencemaran logam berat melalui perubahan populasi dan struktur komunitas. Collembola, semut, dan kumbang tanah sering digunakan dalam studi ekotoksikologi tanah karena kelompok ini hidup dekat dengan lapisan tanah atas dan serasah. Namun, sensitivitas setiap kelompok tidak selalu sama. Karena itu, penelitian ini tidak menempatkan satu takson tunggal sebagai indikator mutlak, tetapi menilai kekuatan indikator pada tingkat komunitas epifauna secara keseluruhan (Gruss et al., 2024; Ghannem et al., 2024).

Lahan bekas tambang emas memiliki karakter tekanan ekologis yang kompleks. Residu pengolahan mineral dapat meningkatkan konsentrasi logam berat di permukaan tanah, menurunkan bahan organik, mengubah pH, dan membatasi mikrohabitat bagi fauna tanah. Serangga epifauna yang bergerak di permukaan tanah dan lapisan serasah berpotensi merekam perubahan

tersebut melalui komposisi komunitasnya, sehingga sesuai digunakan untuk menilai kondisi ekologis lahan pasca-tambang.

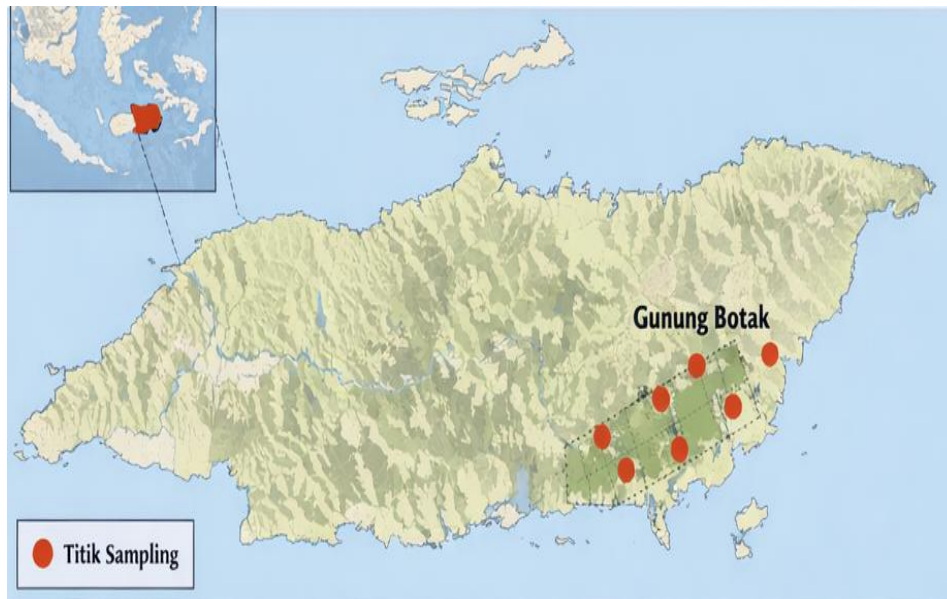
Dalam tanah tercemar, komunitas serangga sering mengalami penyederhanaan struktur. Kondisi ini dapat muncul sebagai penurunan nilai keanekaragaman dan pemerataan, sekaligus meningkatnya dominansi takson yang lebih toleran. Pola tersebut penting karena kelimpahan total yang tinggi tidak selalu berarti ekosistem lebih sehat. Kelimpahan dapat meningkat pada lokasi tercemar apabila hanya beberapa takson toleran yang mendominasi komunitas.

Penelitian serangga epifauna sebagai bioindikator pada lahan pasca-tambang emas di Maluku masih terbatas dalam cakupan lokasi dan konteks ekosistem. Sebagian besar studi bioindikator tanah di Indonesia lebih banyak dilakukan pada lahan pertanian, gambut, atau hutan, sedangkan data dari lahan pasca-tambang emas tropis kepulauan masih jarang dilaporkan. Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini menganalisis keragaman, kelimpahan, dan komposisi serangga epifauna sebagai indikator pencemaran tanah pada lahan bekas tambang emas Gunung Botak, Maluku. Hasil penelitian diharapkan memberi

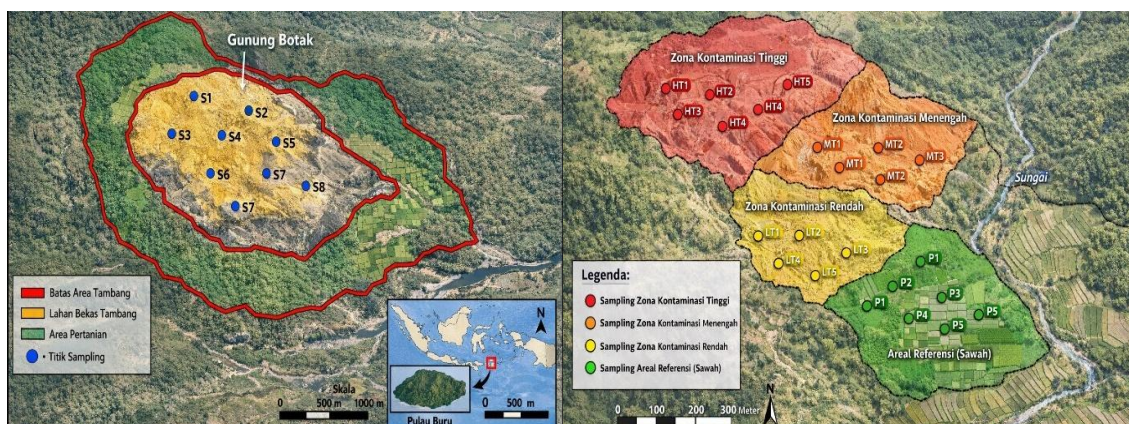
dasar ekologis bagi pemantauan dan rehabilitasi lahan pasca-tambang (Chowdhury et al., 2023; Iqbal et al., 2025).

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan desain studi lapangan komparatif untuk menganalisis hubungan antara kontaminasi logam berat dan komunitas serangga epifauna di lahan bekas tambang emas Gunung Botak, Kabupaten Buru, Maluku, Indonesia. Sebanyak 20 titik sampling ditetapkan secara stratified random sampling, terdiri atas lima titik pada zona kontaminasi tinggi, lima titik pada zona kontaminasi sedang, lima titik pada zona kontaminasi rendah, dan lima titik pada zona referensi berupa lahan pertanian di sekitar area tambang. Istilah tinggi, sedang, dan rendah merujuk pada tingkat kontaminasi logam berat berdasarkan kedekatan dengan pusat aktivitas tambang dan hasil pengukuran Pb, Cd, dan Hg, bukan ketinggian tempat. Variabel biologis yang dianalisis meliputi kelimpahan total, jumlah takson, indeks Shannon-Wiener, indeks Simpson, evenness, dan komposisi takson serangga epifauna.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Gunung Botak, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku, Indonesia. Titik merah menunjukkan titik sampling, sedangkan inset menunjukkan posisi Pulau Buru dalam konteks wilayah Indonesia.



Gambar 2. Titik sampling serangga dan tanah pada empat zona penelitian. Keterangan: HT = zona kontaminasi tinggi, MT = zona kontaminasi sedang, LT = zona kontaminasi rendah, P = zona referensi/pertanian, dan S = titik sampling.

Komunitas serangga epifauna dikumpulkan menggunakan dua metode, yaitu pitfall trap dan Berlese-Tullgren funnel. Pitfall trap digunakan untuk menangkap serangga dan artropoda yang aktif bergerak di permukaan tanah, seperti kumbang tanah, semut, belalang, dan kelompok epifauna lain. Berlese-Tullgren funnel digunakan untuk mengekstraksi organisme kecil dari serasah dan lapisan

tanah atas melalui gradien panas dan cahaya, sehingga individu yang berada dalam sampel serasah bergerak turun ke wadah koleksi.

Pada setiap plot berukuran 10 m × 10 m dipasang 12 pitfall trap selama 72 jam. Karena terdapat 20 plot, jumlah pitfall trap yang digunakan adalah 240 unit. Sampel serasah dan tanah atas sebanyak ±300-500 g diambil dari setiap plot untuk diekstraksi menggunakan Berlese-

Tullgren funnel. Organisme hasil koleksi dari kedua metode tersebut diawetkan secara basah menggunakan etanol 70% sebelum identifikasi laboratorium.

Spesimen yang terkumpul dipilah dan diidentifikasi hingga tingkat ordo, famili, dan morfospesies sesuai kondisi spesimen, menggunakan kunci identifikasi serangga dan artropoda tanah yang umum digunakan dalam kajian entomologi, antara lain Triplehorn dan Johnson (2005) serta Bolton (1994) untuk kelompok semut. Variabel komunitas yang dihitung meliputi kelimpahan total, jumlah takson, indeks Shannon-Wiener, indeks Simpson, dan evenness. PAST digunakan untuk menghitung indeks keanekaragaman dan statistik deskriptif, sedangkan R dengan paket *vegan* digunakan untuk analisis multivariat, termasuk analisis kluster dan *Redundancy Analysis* (RDA).

Parameter tanah yang diukur meliputi pH, kelembapan tanah, kandungan bahan organik, dan konsentrasi logam berat Pb, Cd, dan Hg. pH tanah diukur menggunakan pH meter tanah pada sampel yang telah dihomogenkan. Kelembapan tanah ditentukan secara gravimetrik, sedangkan bahan organik dianalisis dengan metode pengabuan/loss on ignition. Konsentrasi Pb, Cd, dan Hg dianalisis menggunakan Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) setelah proses destruksi asam

sesuai prosedur analisis tanah. Uji Kruskal-Wallis digunakan untuk membandingkan parameter komunitas antar zona kontaminasi.

Analisis multivariat dilakukan dengan RDA untuk mengevaluasi hubungan antara komposisi komunitas serangga dan variabel lingkungan. Sistem Informasi Geografis atau Geographic Information System (GIS) digunakan untuk mengolah koordinat titik sampling dan memetakan distribusi logam berat. Interpolasi spasial dilakukan menggunakan Inverse Distance Weighting (IDW) dan *ordinary kriging*. IDW memperkirakan nilai pada lokasi tidak tersampel berdasarkan kedekatan jarak antartitik, sedangkan kriging memperkirakan nilai spasial dengan mempertimbangkan struktur autokorelasi data melalui variogram (Li & Heap, 2011; Oliver & Webster, 2014).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Lingkungan dan Parameter Tanah

Hasil pengukuran dari 20 titik sampling menunjukkan gradien fisiko-kimia tanah yang jelas antar zona kontaminasi. Variasi yang dimaksud meliputi perubahan pH, kelembapan, bahan organik, serta konsentrasi Pb, Cd, dan Hg dari zona kontaminasi tinggi hingga zona referensi.

Tabel 1. Rata-rata Parameter Tanah per Zona Kontaminasi

Zona	pH	Kelembapan (%)	Bahan Organik (%)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)
Tinggi	5.8 ± 0.2	22.5 ± 3.1	1.2 ± 0.3	350 ± 25	12 ± 2	8.4 ± 1.1
Sedang	6.1 ± 0.3	25.0 ± 2.5	1.8 ± 0.2	180 ± 15	6 ± 1	4.1 ± 0.5
Rendah	6.4 ± 0.2	28.5 ± 3.2	2.5 ± 0.4	85 ± 8	2.3 ± 0.4	1.2 ± 0.3
Referensi	6.8 ± 0.1	31.0 ± 2.9	3.1 ± 0.3	20 ± 3	0.8 ± 0.2	0.5 ± 0.1

Tabel 1 menunjukkan bahwa zona kontaminasi tinggi memiliki tanah lebih asam dan lebih miskin

bahan organik dibandingkan zona referensi. Nilai pH meningkat dari 5,8 pada zona kontaminasi tinggi

menjadi 6,8 pada zona referensi, sehingga tanah bergerak dari kondisi relatif asam menuju kondisi lebih netral. Kelembapan juga meningkat dari 22,5% pada zona kontaminasi tinggi menjadi 31,0% pada zona referensi, sedangkan bahan organik meningkat dari 1,2% menjadi 3,1%.

Pola logam berat memperlihatkan perbedaan yang lebih tajam. Pb pada zona kontaminasi tinggi mencapai 350 mg/kg, sedangkan zona referensi hanya 20 mg/kg. Cd menurun dari 12 mg/kg menjadi 0,8 mg/kg, dan Hg menurun dari 8,4 mg/kg menjadi 0,5 mg/kg. Dengan demikian, zona kontaminasi tinggi memiliki Pb sekitar 17,5 kali, Cd sekitar 15 kali, dan Hg sekitar 16,8 kali lebih tinggi dibandingkan zona referensi. Data ini menegaskan bahwa kategori tinggi, sedang, rendah, dan referensi dalam artikel ini adalah kategori tingkat kontaminasi logam berat.

Kombinasi pH yang lebih rendah, bahan organik yang lebih sedikit, dan

konsentrasi Pb, Cd, serta Hg yang lebih tinggi menunjukkan bahwa zona kontaminasi tinggi menyediakan kondisi habitat yang lebih menekan bagi komunitas epifauna. Sebaliknya, zona referensi memiliki kondisi tanah yang lebih mendukung karena pH lebih mendekati netral, kelembapan lebih tinggi, bahan organik lebih besar, dan konsentrasi logam berat lebih rendah.

Hasil Pengambilan Serangga Epifauna

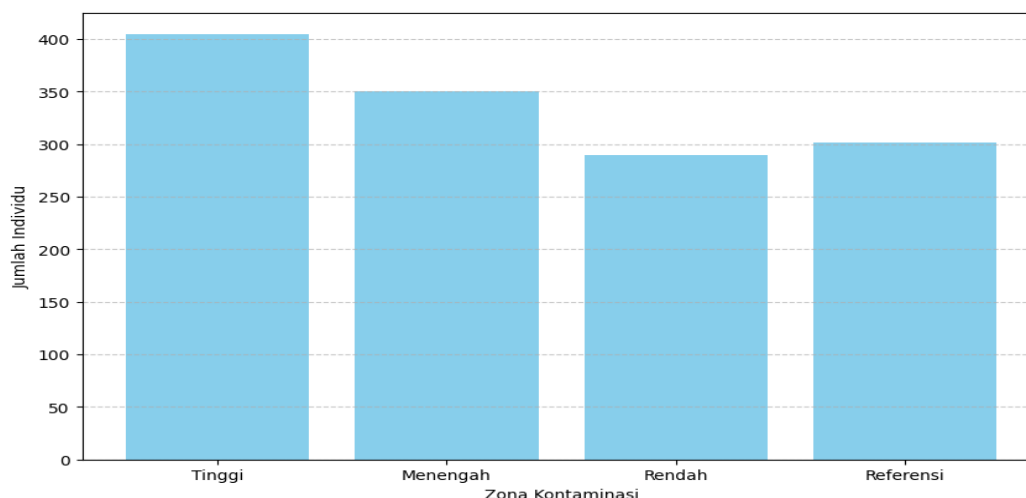
Dari 20 titik sampling pada zona kontaminasi tinggi, sedang, rendah, dan referensi ditemukan total 1.347 individu serangga dan artropoda epifauna. Distribusi individu setiap zona disajikan dalam Tabel 2. Sebanyak 54 takson teridentifikasi, yang mencakup Coleoptera, Hymenoptera, Diptera, Lepidoptera, Orthoptera, Collembola, dan kelompok lain.

Tabel 2. Kelimpahan Serangga per Zona Kontaminasi

Ordo/Taksa	Tinggi	Sedang	Rendah	Referensi
Coleoptera	120	95	68	55
Hymenoptera	85	80	72	70
Diptera	60	50	40	35
Lepidoptera	20	18	15	20
Orthoptera	15	12	10	12
Collembola	60	55	50	65
Lainnya	45	40	35	45
Total	405	350	290	302

Berdasarkan Tabel 2, kelimpahan total tidak menurun seiring meningkatnya kontaminasi. Zona kontaminasi tinggi justru memiliki kelimpahan total tertinggi, yaitu 405 individu, diikuti zona sedang 350 individu, zona referensi 302 individu, dan zona rendah 290 individu. Pola ini terutama dipengaruhi oleh tingginya

jumlah Coleoptera dan Hymenoptera pada zona kontaminasi tinggi. Karena itu, kelimpahan total tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator kesehatan tanah; interpretasi harus digabungkan dengan keanekaragaman, pemerataan, dan komposisi takson.



Gambar 3. Kelimpahan total serangga epifauna pada setiap zona kontaminasi.

Berdasarkan Gambar 3, jumlah individu tertinggi terdapat pada zona kontaminasi tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa kontaminasi logam berat tidak selalu menurunkan jumlah individu secara total, tetapi dapat mengubah struktur komunitas melalui dominasi beberapa takson toleran. Zona referensi memiliki kelimpahan total lebih rendah daripada zona kontaminasi tinggi, tetapi data keanekaragaman pada

Tabel 3 menunjukkan bahwa komunitasnya lebih merata dan lebih beragam.

Analisis Keanekaragaman

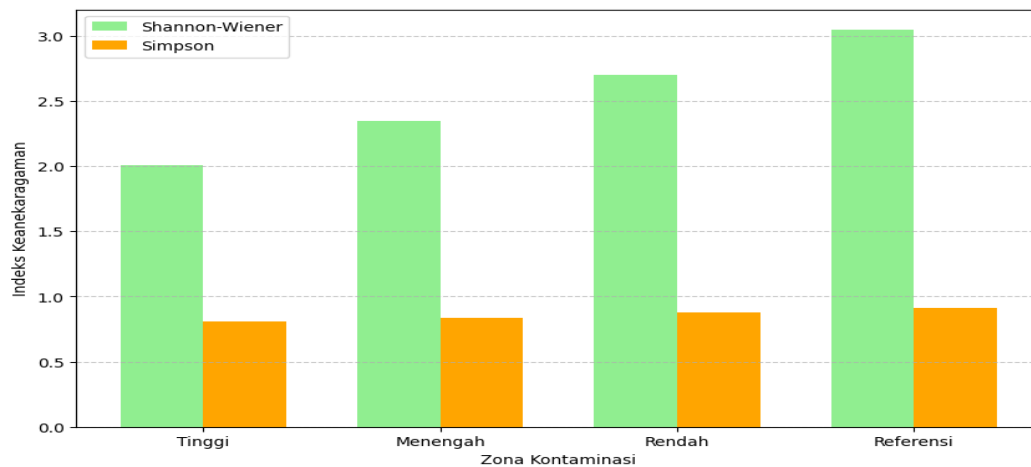
Indeks Shannon-Wiener (H'), Simpson (D), dan evenness (E) dihitung untuk membandingkan struktur komunitas antar zona. Hasilnya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Indeks Keanekaragaman Serangga per Zona

Zona	Shannon-Wiener (H')	Simpson (D)	Evenness (E)
Tinggi	2.01 ± 0.15	0.81 ± 0.03	0.68 ± 0.05
Sedang	2.35 ± 0.12	0.84 ± 0.02	0.72 ± 0.04
Rendah	2.70 ± 0.10	0.88 ± 0.01	0.78 ± 0.03
Referensi	3.05 ± 0.08	0.91 ± 0.01	0.82 ± 0.02

Tabel 3 memperlihatkan bahwa keanekaragaman meningkat dari zona kontaminasi tinggi menuju zona referensi. Nilai Shannon-Wiener meningkat dari 2,01 pada zona tinggi menjadi 3,05 pada zona referensi. Evenness juga meningkat dari 0,68 menjadi 0,82. Nilai Simpson relatif

berdekatan antar zona, tetapi tetap menunjukkan nilai terendah pada zona kontaminasi tinggi dan tertinggi pada zona referensi. Dengan demikian, indikator yang paling jelas dalam data ini adalah penurunan keanekaragaman dan pemerataan pada zona kontaminasi tinggi.



Gambar 4. Indeks keanekaragaman serangga epifauna pada setiap zona kontaminasi.

Gambar 4 memvisualisasikan data indeks pada Tabel 3, sehingga berbeda dari Gambar 3 yang hanya menampilkan kelimpahan total. Grafik ini menunjukkan bahwa zona kontaminasi tinggi memiliki nilai Shannon-Wiener, Simpson, dan evenness paling rendah. Perbedaan nilai Simpson antar zona lebih kecil dibandingkan Shannon-Wiener dan evenness, sehingga Simpson ditafsirkan secara hati-hati sebagai indikator pendukung, bukan indikator utama.

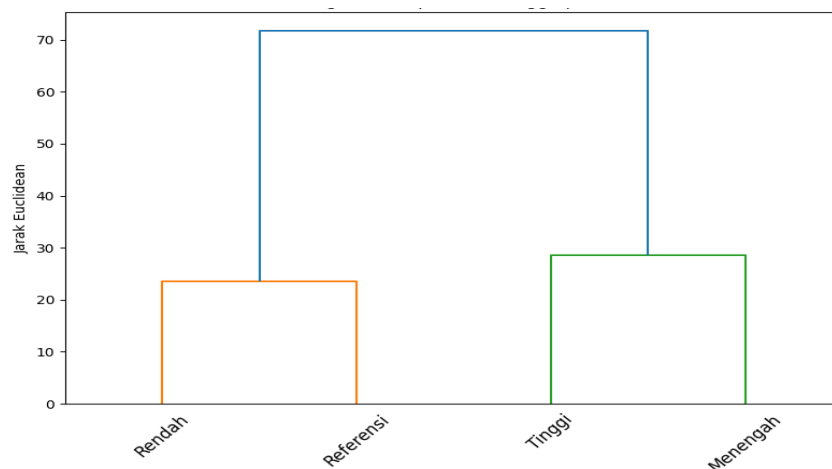
Uji Kruskal-Wallis menunjukkan adanya perbedaan bermakna antar zona pada parameter komunitas utama ($p < 0,01$). Hasil ini mendukung bahwa gradien kontaminasi berkaitan dengan perubahan struktur komunitas epifauna. Namun, arah perubahan tidak boleh disederhanakan sebagai penurunan kelimpahan total, karena Tabel 2 menunjukkan kelimpahan tertinggi berada pada zona kontaminasi tinggi. Dampak ekologis yang lebih kuat terlihat pada rendahnya keanekaragaman dan

kemerataan, serta meningkatnya dominansi takson toleran.

Komposisi Komunitas Serangga

Analisis komposisi komunitas menggunakan analisis kluster menunjukkan tiga pola utama.

- 1) Pertama, zona kontaminasi tinggi dicirikan oleh dominasi beberapa takson yang lebih toleran, terutama Coleoptera dan Hymenoptera.
- 2) Kedua, zona sedang dan rendah menunjukkan komposisi transisi antara zona kontaminasi tinggi dan zona referensi.
- 3) Ketiga, Collembola tetap hadir pada semua zona, tetapi pola kelimpahannya tidak cukup kuat untuk dijadikan indikator tunggal. Dalam penelitian ini, Collembola lebih tepat ditafsirkan sebagai kelompok yang relatif toleran, sedangkan indikator utama pencemaran berada pada pola komunitas secara keseluruhan.

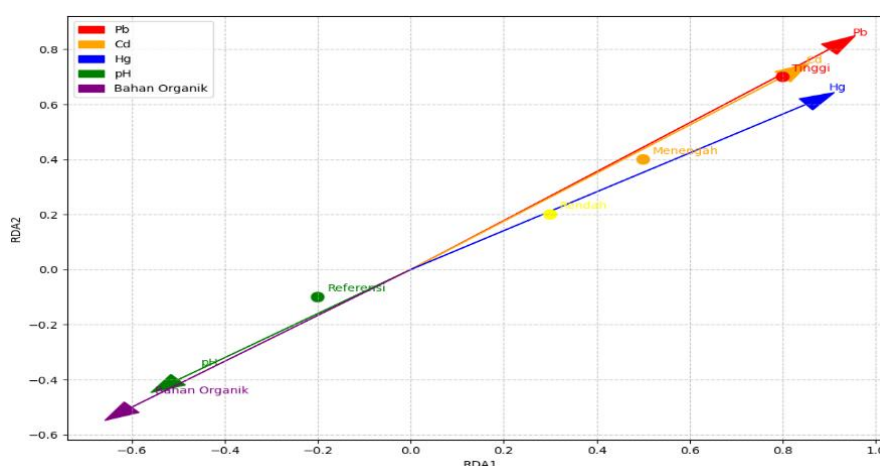


Gambar 5. Dendrogram komposisi serangga epifauna pada setiap zona kontaminasi.

Dendrogram pada Gambar 5 menunjukkan kemiripan komposisi komunitas antar zona. Zona kontaminasi tinggi dan sedang membentuk kelompok yang lebih dekat, sedangkan zona referensi terpisah dari zona lain. Pola ini menunjukkan bahwa kontaminasi logam berat berkaitan dengan pergeseran komposisi komunitas, terutama melalui dominasi takson toleran pada zona tercemar dan komunitas yang lebih seimbang pada zona referensi.

Hubungan Komunitas Serangga dengan Kontaminasi Logam Berat

Redundancy Analysis (RDA) digunakan untuk menilai arah hubungan antara variabel lingkungan dan komposisi komunitas. Hasil RDA menunjukkan bahwa vektor Pb, Cd, dan Hg mengarah ke zona kontaminasi tinggi, sedangkan pH yang lebih netral dan bahan organik lebih tinggi berasosiasi dengan zona referensi. Artinya, logam berat terutama berkaitan dengan pergeseran komposisi dan peningkatan dominansi takson toleran, bukan semata-mata penurunan kelimpahan total.



Gambar 6. Plot RDA hubungan komunitas serangga epifauna dan logam berat.

Gambar 6 menegaskan bahwa kontaminasi Pb, Cd, dan Hg berasosiasi dengan zona kontaminasi tinggi, sedangkan pH dan bahan organik berasosiasi dengan komunitas yang lebih beragam pada zona referensi. Dalam konteks penelitian ini, pengaruh variabel lingkungan terlihat dalam tiga bentuk: penurunan nilai keanekaragaman, penurunan pemerataan, dan pergeseran komposisi menuju dominansi takson yang lebih toleran.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pencemaran logam berat memengaruhi komunitas serangga epifauna terutama melalui perubahan struktur komunitas. Zona kontaminasi tinggi tidak memiliki kelimpahan total lebih rendah, tetapi memiliki keanekaragaman dan pemerataan paling rendah. Temuan ini menegaskan bahwa total individu tidak cukup untuk menilai kondisi ekologis; komunitas yang didominasi beberapa takson toleran dapat memiliki kelimpahan tinggi tetapi kualitas ekologisnya rendah.

Hasil RDA memperkuat interpretasi tersebut. Pb, Cd, dan Hg berasosiasi dengan zona kontaminasi tinggi dan komposisi komunitas yang lebih homogen. Sebaliknya, pH yang lebih mendekati netral dan kandungan bahan organik yang lebih tinggi berasosiasi dengan zona referensi yang memiliki nilai Shannon-Wiener dan evenness lebih tinggi. Bahan organik dapat menyediakan mikrohabitat dan sumber energi bagi organisme tanah, sedangkan pH yang lebih netral dapat menurunkan bioavailabilitas logam berat pada tanah tertentu.

Dengan demikian, pengaruh kontaminasi dalam penelitian ini tampak pada perubahan komposisi dan struktur

komunitas, bukan pada penurunan kelimpahan total secara sederhana. Interpretasi ini penting karena beberapa takson, seperti Coleoptera dan Hymenoptera, dapat meningkatkan jumlahnya pada zona tercemar, sementara takson lain menurun atau menjadi kurang dominan. Collembola yang tetap hadir pada semua zona menunjukkan toleransi relatif, tetapi tidak cukup kuat untuk dipakai sebagai bioindikator tunggal pada dataset ini.

Interpolasi spasial berbasis GIS menghasilkan peta distribusi logam berat yang menunjukkan heterogenitas kontaminasi di lahan bekas tambang. Hotspot kontaminasi berada dekat dengan area bekas aktivitas tambang dan menurun menuju zona referensi. Informasi spasial ini penting untuk menentukan lokasi prioritas rehabilitasi karena tidak semua bagian lahan pasca-tambang memiliki tingkat kontaminasi yang sama.

IDW dan *ordinary kriging* digunakan sebagai metode interpolasi karena keduanya lazim dipakai untuk memetakan variabel lingkungan berbasis titik sampling. IDW menekankan pengaruh jarak antartitik, sedangkan kriging mempertimbangkan struktur spasial data melalui variogram. Dalam penelitian ini, kedua pendekatan tersebut membantu menggambarkan pola sebaran kontaminan dan memperkuat interpretasi biologis dari data komunitas epifauna (Li & Heap, 2011; Oliver & Webster, 2014).

Temuan penelitian ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa serangga dan artropoda tanah dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan lingkungan akibat kontaminasi. Namun, hasil Gunung Botak menunjukkan bahwa indikator yang paling informatif bukan

kelimpahan total, melainkan kombinasi antara keanekaragaman, pemerataan, dominansi takson, dan posisi komunitas dalam analisis multivariat. Dengan cara baca tersebut, serangga epifauna berfungsi sebagai bioindikator komunitas yang sensitif terhadap pencemaran tanah.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa istilah penurunan kelimpahan perlu digunakan secara hati-hati. Data Tabel 2 tidak menunjukkan penurunan kelimpahan total pada zona kontaminasi tinggi. Pola yang lebih tepat adalah peningkatan kelimpahan beberapa takson toleran dan penurunan keseimbangan komunitas. Oleh sebab itu, kesimpulan ekologis harus bertumpu pada struktur komunitas, bukan jumlah individu secara agregat.

Secara mekanistik, pola tersebut dapat dijelaskan melalui tekanan logam berat pada organisme yang sensitif serta kemampuan sebagian takson untuk bertahan pada habitat terganggu. pH tanah yang lebih asam dapat meningkatkan kelarutan beberapa logam, sedangkan bahan organik yang rendah dapat mengurangi kapasitas tanah dalam mengikat kontaminan. Kondisi ini membuat zona kontaminasi tinggi lebih selektif terhadap kelompok epifauna tertentu dan menghasilkan komunitas yang lebih homogen.

Implikasi praktisnya, pemantauan lahan pasca-tambang sebaiknya tidak hanya mengukur konsentrasi logam berat, tetapi juga memantau respons komunitas epifauna. Perubahan Shannon-Wiener, evenness, komposisi takson, dan hasil ordination dapat digunakan sebagai indikator awal pemulihan atau degradasi lanjutan. Pendekatan gabungan antara data tanah, serangga epifauna, analisis multivariat,

dan peta GIS memberikan dasar yang lebih kuat untuk menentukan prioritas rehabilitasi lahan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kontaminasi Pb, Cd, dan Hg pada lahan bekas tambang emas Gunung Botak berkaitan dengan perubahan komunitas serangga epifauna. Zona kontaminasi tinggi memiliki konsentrasi logam berat paling besar, pH lebih asam, bahan organik lebih rendah, dan nilai keanekaragaman serta pemerataan paling rendah. Kelimpahan total tidak menurun pada zona kontaminasi tinggi; zona ini justru memiliki jumlah individu tertinggi karena dominasi beberapa takson toleran. Oleh karena itu, serangga epifauna lebih tepat digunakan sebagai bioindikator pada tingkat komunitas melalui kombinasi keanekaragaman, pemerataan, dominansi, dan komposisi takson, bukan berdasarkan kelimpahan total atau satu takson tunggal seperti *Collembola*. Analisis RDA dan peta GIS memperkuat kesimpulan bahwa gradien logam berat berasosiasi dengan pergeseran komunitas dan distribusi kontaminasi yang heterogen. Hasil ini dapat digunakan sebagai dasar pemantauan ekologis dan penentuan prioritas rehabilitasi lahan pasca-tambang

5. DAFTAR PUSTAKA

Azam I., Afsheen S., Zia A., Javed M., Saeed R., Sarwar M.K, Munir B. (2015). Evaluating Insects as Bioindicators of Heavy Metal Contamination and Accumulation near Industrial Area of Gujrat, Pakistan. *Biomed Research International*.

- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4488521/>.
- Bolton, B. (1994). Identification Guide to the Ant Genera of the World. Harvard University Press.
- Borcard, D., Legendre, P., Drapeau, P. (1992). Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 73(3): 1045-1055.
- Chowdhury, S., Dubey, V.K., Das, A., Jeengar, D., Sujatha, B., & Kumar, V. (2023). *Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring*. Frontiers in Environmental Science. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2023.1146052/full>.
- Fahmi, M.I.N., Mahanal, S., Zubaidah, S., Ibrohim. (2025). Bioindicator Trends in Studying Environmental Pollution: A Systematic Review. *Jurnal Penelitian dan Pengkajian Ilmu Pendidikan e-Saintika* 9(2):107-126. DOI:[10.36312/e-saintika.v9i2.1704](https://doi.org/10.36312/e-saintika.v9i2.1704).
- Ghannem, S., Bacha, O., Fkiri, S., Kanzari, S., Aydi, A., Touaylia, S. (2024). *Soil and sediment organisms as bioindicators of pollution*. *Ecologies*, 5(4): 679-696. <https://www.mdpi.com/2673-4133/5/4/40>.
- Gruss, I., Lallaouna, R., Twardowski, J. (2024). Collembola growth in heavy metal-contaminated soils. *Sci Rep* 14, 27998. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79766-5>.
- Hammer, O., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9.
- Hussein, H. S., Nasser A., T., Saad, M., Abo-Shanab, A. S., El-Samad, L. M. (2025). *Physiological, molecular and histological response of Pentodon bispinosus larvae as bioindicator for soil pollutants*. Scientific Reports. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-15417-7>.
- Iqbal, S., Waseem, M., Ullah, S., Arshad, R., Dur-E-Najaf, A. (2025). A review of heavy metals bioaccumulation in insects for environmental monitoring. *Journal of Basic and Applied Zoology*, 82, 15-29. <https://link.springer.com/article/10.1186/s41936-025-00489-8>.
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012) Numerical Ecology, Developments in Environmental Modelling. 3rd Edition, Elsevier, Amsterdam, 419.
- Li J., & Heap, A.D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3-4): 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>.
- Mahanta, D.K. (2026). Research analysis on insects as environmental pollution indicators. *Environmental Pollution Analysis*, 12: 101-118.
- Manu, M. (2022). Soil invertebrate communities as indicators of ecological quality. *Soil Invertebrate Ecology Studies*, 8: 45-60.
- Mohammad, S.J., Ling, Y.E., Halim, K.A. (2025). Heavy metal pollution and transformation in soil: a comprehensive review of natural bioremediation strategies. *J.Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci.* 11, 528-544.

<https://doi.org/10.1007/s43994-025-00241-6>.

Oktariansyah, Y., Kamal M., Patricia, M. (2025). *Analisis keanekaragaman serangga tanah sebagai bioindikator kesehatan ekosistem: studi kasus lahan gambut Desa Perigi, Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan*. Sriwijaya Bioscientia, 6(2): 68-83 <https://doi.org/10.24233/sribios.6.2.2025.506>.

Oliver, M.A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113: 56-69.

Pallottini, M., Goretti, E., Argenti, C. (2023). Butterflies as bioindicators of metal contamination. *Environ Sci Pollut Res* 30, 95606-95620. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28930-x>.

Priya, V., Mandal, S.K., Dubey, V.K., Patel, D.K. (2025). Insects as bioindicator of environmental changes and pollution. *Indian Farming*, 75(4): 22-31. <https://www.researchgate.net/publication/388421553>.

Triplehorn, C. A., & Johnson, N. F. (2005). Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects (7th ed.). Thomson Brooks/Cole.