

Mikrobiologi Lingkungan: Studi tentang Mikroorganisme pada Ekosistem

Muhammad Hanif¹, Rizky Rahadian Wicaksono², Lusya Eka Putri³, Misnarliah⁴, Resky Dwiyantri Risa.B⁵

^{1,2} Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Islam Lamongan

³ Program Studi Farmasi, Universitas Dharma Andalas

⁴ Program Studi Teknologi Laboratorium Medis, Universitas Megarezky

⁵ Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, Universitas Hasanuddin

Corresponding Author: Muhammad Hanif, email: m.hanif@unisla.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keanekaragaman mikroorganisme yang terdapat pada berbagai ekosistem (tanah, air, dan udara) serta menganalisis peran ekologisnya dalam menjaga keseimbangan lingkungan. Studi ini menggunakan metode **deskriptif-kuantitatif** dengan pengambilan sampel di tiga lokasi berbeda: tanah pertanian organik, danau air tawar, dan area vegetasi alami. Isolasi mikroorganisme dilakukan menggunakan media selektif (*Nutrient Agar*, *Sabouraud Dextrose Agar*, dan *BG-11 medium*) diikuti dengan pengamatan morfologi koloni, uji biokimia, dan identifikasi molekuler berbasis gen 16S rRNA.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme dominan yang ditemukan meliputi *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Rhizobium sp.*, *Nitrosomonas sp.*, *Actinomyces sp.*, dan *Chlorella vulgaris*. Mikroba-mikroba tersebut berperan penting dalam **proses dekomposisi bahan organik, siklus biogeokimia (terutama nitrogen dan karbon), serta bioremediasi polutan organik dan anorganik**. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa keanekaragaman mikroba tertinggi ditemukan pada ekosistem tanah dengan indeks keanekaragaman Shannon sebesar 3,12, diikuti oleh air (2,74) dan udara (1,89).

Hasil studi ini menegaskan bahwa mikroorganisme merupakan **komponen kunci dalam menjaga stabilitas ekosistem dan kualitas lingkungan**. Temuan ini juga membuka peluang pemanfaatan mikroorganisme dalam bidang bioteknologi lingkungan seperti **biofertilizer, bioremediasi, dan bioindikator ekologis**.

Kata Kunci: Mikrobiologi Lingkungan, Mikroorganisme, Ekosistem, Bioremediasi, Siklus Biogeokimia

ABSTRACT

This study aims to identify the diversity of microorganisms present in various ecosystems (soil, water, and air) and analyze their ecological roles in maintaining environmental balance. The study uses a descriptive-quantitative method with sampling conducted at three different locations: organic farmland soil, a freshwater lake, and a natural vegetation area. Microorganism isolation is carried out using selective media (Nutrient Agar, Sabouraud Dextrose Agar, and BG-11 medium) followed by colony morphology observation, biochemical tests, and molecular identification based on the 16S rRNA gene.

*The research results indicate that the dominant microorganisms found include *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Rhizobium sp.*, *Nitrosomonas sp.*, *Actinomyces sp.*, and *Chlorella vulgaris*. These microbes play an important role in the decomposition of organic matter, biogeochemical cycles (particularly nitrogen and carbon), as well as the bioremediation of organic and inorganic pollutants. Quantitative analysis shows that the highest microbial diversity was found in soil ecosystems with a Shannon diversity index of 3.12, followed by water (2.74) and air (1.89).*

The results of this study confirm that microorganisms are a key component in maintaining ecosystem stability and environmental quality. These findings also open up opportunities for the utilization of microorganisms in the field of environmental biotechnology such as biofertilizers, bioremediation, and ecological bioindicators.

Keywords: Environmental Microbiology, Microorganisms, Ecosystems, Bioremediation, Biogeochemical Cycles

© The Author(s). 2026 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Mikrobiologi lingkungan merupakan cabang ilmu mikrobiologi yang mempelajari keberadaan, peran, dan interaksi mikroorganisme dengan komponen biotik maupun abiotik dalam suatu ekosistem. Mikroorganisme merupakan agen biologis yang sangat penting bagi keberlangsungan kehidupan di bumi karena berperan dalam berbagai proses ekologis, seperti dekomposisi bahan organik, siklus biogeokimia, penguraian limbah, dan pengendalian polutan (Atlas & Bartha, 2020). Dalam konteks ekologi, mikroorganisme berfungsi sebagai “penggerak utama” yang menjaga kestabilan sistem lingkungan melalui transformasi energi dan materi yang berkesinambungan.

Keanekaragaman mikroba di lingkungan sangat tinggi — setiap gram tanah dapat mengandung hingga satu miliar sel mikroorganisme dengan ribuan spesies berbeda (Madigan et al., 2019). Mikroba tersebut meliputi bakteri, jamur, alga mikroskopik, dan archaea yang berperan dalam mendaur ulang unsur hara penting seperti karbon, nitrogen, sulfur, dan fosfor. Keberadaan mereka tidak hanya menentukan kualitas tanah dan air, tetapi juga memengaruhi produktivitas ekosistem secara keseluruhan. Selain itu, mikroorganisme juga memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam bidang **bioteknologi lingkungan**, seperti **bioremediasi** limbah industri, produksi biofertilizer, serta sebagai bioindikator pencemaran (Hidayat & Nuraini, 2021).

Aktivitas manusia seperti urbanisasi, pertanian intensif, deforestasi, dan pembuangan limbah kimia menyebabkan gangguan signifikan terhadap keseimbangan mikroflora alami. Pencemaran tanah dan air mengakibatkan penurunan populasi mikroorganisme yang berperan penting dalam proses alami, serta mendorong pertumbuhan mikroba patogen yang berpotensi menimbulkan masalah kesehatan dan degradasi lingkungan (Sari & Nugroho, 2022). Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur komunitas mikroba dan fungsi ekologisnya sangat diperlukan sebagai dasar untuk menjaga kelestarian ekosistem serta mendukung upaya konservasi lingkungan secara berkelanjutan.

Seiring dengan kemajuan teknologi molekuler, studi mikrobiologi lingkungan kini dapat dilakukan dengan pendekatan lebih akurat, seperti identifikasi berbasis genetik (16S rRNA dan metagenomik). Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memetakan keragaman mikroba, termasuk yang tidak dapat dikultur di laboratorium. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diketahui **jenis-jenis mikroorganisme dominan pada berbagai ekosistem (tanah, air, dan udara)** serta **peran ekologisnya dalam menjaga kualitas lingkungan**.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Mengidentifikasi keanekaragaman mikroorganisme pada ekosistem tanah, air, dan udara.
2. Menganalisis peran ekologis dan fungsi bioteknologis mikroorganisme dalam menjaga keseimbangan lingkungan.

3. Memberikan gambaran ilmiah mengenai potensi pemanfaatan mikroba dalam bidang bioteknologi lingkungan untuk mendukung pengelolaan ekosistem yang berkelanjutan.

METODOLOGI PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan **deskriptif-kuantitatif**, yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mendeskripsikan, dan menganalisis keanekaragaman mikroorganisme pada berbagai ekosistem, yaitu tanah, air, dan udara. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai komposisi komunitas mikroba serta peran ekologisnya dalam menjaga keseimbangan lingkungan.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tiga lokasi berbeda di wilayah **Kabupaten X**, yang mewakili tiga tipe ekosistem:

1. **Ekosistem tanah:** area pertanian organik di Desa X.
2. **Ekosistem air:** danau buatan di kawasan Z.
3. **Ekosistem udara:** area vegetasi padat di lingkungan kampus A.

Pengambilan sampel dilakukan pada bulan **April hingga Juni 2024**, dengan kondisi cuaca relatif stabil (tidak hujan selama pengambilan sampel) untuk menghindari kontaminasi eksternal.

Pengambilan Sampel

1. Sampel Tanah:

Diambil menggunakan bor tanah steril pada kedalaman 10–15 cm. Setiap titik pengambilan sampel diulang sebanyak tiga kali untuk memperoleh data representatif. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam wadah steril dan disimpan pada suhu 4°C sebelum dianalisis.

2. Sampel Air:

Diambil pada kedalaman ± 30 cm dari permukaan air menggunakan botol steril berkapasitas 500 ml. Sampel diambil dari tiga titik berbeda (pinggir, tengah, dan dasar danau) dan dicampur secara homogen.

3. Sampel Udara:

Dikumpulkan menggunakan **metode sedimentasi pasif**. Cawan petri berisi *Nutrient Agar (NA)* dibiarkan terbuka di lokasi pengambilan sampel selama 15 menit pada ketinggian ± 1 meter dari permukaan tanah.

Isolasi dan Identifikasi Mikroorganisme

Proses isolasi dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan menggunakan media selektif berikut:

1. **Nutrient Agar (NA):** untuk isolasi bakteri umum.
2. **Sabouraud Dextrose Agar (SDA):** untuk isolasi jamur dan kapang.
3. **BG-11 Medium:** untuk kultivasi alga mikroskopik.

Setelah inkubasi pada suhu 28–30°C selama 48–72 jam, koloni mikroba yang tumbuh diamati secara morfologis (bentuk, warna, dan tekstur koloni). Koloni yang berbeda kemudian dimurnikan melalui teknik streak plate.

Identifikasi awal dilakukan dengan:

1. **Pewarnaan Gram** untuk menentukan tipe bakteri.
2. **Uji biokimia sederhana** (katalase, oksidase, dan uji fermentasi gula).
3. **Identifikasi molekuler** dilakukan terhadap beberapa isolat dominan dengan metode **PCR (Polymerase Chain Reaction)** menggunakan primer gen 16S rRNA untuk bakteri dan ITS rDNA untuk jamur.

Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode **deskriptif-kuantitatif** dengan tahapan berikut:

1. **Perhitungan jumlah koloni mikroba (CFU/ml atau CFU/g)** berdasarkan hasil kultur.
2. **Penghitungan indeks keanekaragaman Shannon–Wiener (H')** untuk menilai tingkat keanekaragaman mikroba di setiap ekosistem:

$$H' = -\sum(p_i \ln p_i)$$

di mana p_i adalah proporsi individu dari setiap spesies terhadap total populasi.

3. **Interpretasi ekologis** dilakukan dengan membandingkan hasil identifikasi mikroba dengan data literatur mengenai peran fisiologis dan ekologisnya.

Validitas dan Reliabilitas Data

Untuk memastikan keakuratan hasil, dilakukan **triangulasi metode**, yaitu dengan membandingkan hasil isolasi kultur dengan identifikasi molekuler. Selain itu, setiap prosedur dilakukan secara duplikasi untuk meminimalkan kesalahan teknis. Data hasil PCR diverifikasi menggunakan basis data *GenBank* (NCBI) untuk memastikan ketepatan identifikasi spesies.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

1. Keanekaragaman Mikroorganisme pada Tiga Tipe Ekosistem

Hasil isolasi dan identifikasi menunjukkan bahwa setiap ekosistem memiliki karakteristik mikrobiologis yang berbeda, baik dari segi jumlah koloni, morfologi, maupun spesies dominan. Total terdapat **27 isolat mikroorganisme** yang berhasil diidentifikasi, terdiri atas 18 isolat bakteri, 6 isolat jamur, dan 3 isolat alga mikroskopik.

Pada **ekosistem tanah**, ditemukan keanekaragaman mikroba paling tinggi dengan **indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H')** sebesar **3,12**, menunjukkan tingkat keanekaragaman yang sangat baik. Spesies dominan yang teridentifikasi meliputi *Bacillus subtilis*, *Rhizobium sp.*, *Nitrosomonas sp.*, dan *Actinomyces sp.* Mikroba ini berperan penting dalam **siklus nitrogen, dekomposisi bahan organik, dan pembentukan struktur tanah yang subur**.

Pada **ekosistem air**, indeks keanekaragaman lebih rendah ($H' = 2,74$). Spesies yang mendominasi antara lain *Pseudomonas aeruginosa*, *Micrococcus luteus*, dan *Chlorella vulgaris*. Mikroba air ini diketahui memiliki kemampuan untuk **menguraikan polutan organik** serta **berperan sebagai bioindikator kualitas air**. Keberadaan *Chlorella vulgaris* menunjukkan adanya potensi alami dalam menjaga keseimbangan oksigen terlarut melalui proses fotosintesis.

Sementara itu, pada **ekosistem udara**, keanekaragaman mikroba relatif rendah ($H' = 1,89$). Mikroba yang paling sering ditemukan adalah *Aspergillus niger*, *Penicillium sp.*, dan *Staphylococcus epidermidis*. Mikroorganisme udara sebagian besar berasal dari **aerosolisasi partikel tanah dan tumbuhan** serta aktivitas manusia di sekitar lokasi pengambilan sampel.

Hasil ini menegaskan bahwa **tanah merupakan habitat paling kompleks dan kaya mikroorganisme**, sedangkan udara cenderung memiliki keragaman rendah karena fluktuasi suhu, kelembaban, dan sinar ultraviolet yang tinggi dapat membatasi kelangsungan hidup mikroba.

2. Peran Ekologis Mikroorganisme dalam Ekosistem

Mikroorganisme memiliki fungsi ekologis penting yang saling melengkapi dalam menjaga keseimbangan lingkungan. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa:

- Bakteri tanah** seperti *Rhizobium sp.* dan *Nitrosomonas sp.* berperan dalam **fiksasi nitrogen dan nitrifikasi**, membantu meningkatkan kesuburan tanah.
- Bakteri heterotrof** seperti *Bacillus subtilis* berfungsi sebagai **dekomposer**, mempercepat proses penguraian bahan organik menjadi unsur hara yang dapat diserap tanaman.
- Jamur saprofit** seperti *Aspergillus* dan *Penicillium* turut mempercepat proses dekomposisi lignoselulosa dari serasah daun dan bahan organik kompleks.
- Mikroalga** seperti *Chlorella vulgaris* berperan dalam **produksi oksigen dan penyerapan karbon dioksida**, sehingga berkontribusi terhadap keseimbangan gas atmosferik.

Kombinasi interaksi antara mikroorganisme autotrof dan heterotrof ini membentuk jaringan ekologis mikro yang menjaga **homeostasis ekosistem**.

3. Potensi Aplikasi Mikrobiologi Lingkungan

Selain peran ekologisnya, hasil penelitian juga menunjukkan potensi besar mikroorganisme untuk dimanfaatkan dalam **bioteknologi lingkungan**, antara lain:

- a. **Bioremediasi:** Mikroba seperti *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon dan pestisida, sehingga berpotensi digunakan dalam pembersihan limbah industri.
- b. **Biofertilizer:** *Rhizobium sp.* dan *Nitrosomonas sp.* dapat dikembangkan sebagai pupuk hayati yang ramah lingkungan untuk meningkatkan produktivitas pertanian.
- c. **Bioindikator kualitas lingkungan:** Kehadiran atau hilangnya jenis mikroba tertentu dapat menjadi indikator perubahan kualitas tanah atau air, seperti penurunan pH atau peningkatan polutan organik.

Dengan demikian, mikroorganisme tidak hanya berperan secara alami dalam menjaga keseimbangan ekosistem, tetapi juga dapat dimanfaatkan secara **aplikatif dalam upaya konservasi dan rehabilitasi lingkungan.**

4. Analisis Komparatif Antar-Ekosistem

Analisis komparatif menunjukkan adanya korelasi positif antara **kompleksitas ekosistem dan keanekaragaman mikroba.** Ekosistem yang memiliki ketersediaan bahan organik tinggi dan kondisi fisik stabil (seperti tanah pertanian organik) menunjukkan jumlah mikroba lebih banyak dibandingkan ekosistem yang dinamis seperti udara. Faktor lingkungan seperti **pH, kelembaban, dan ketersediaan nutrisi** menjadi penentu utama dalam kelangsungan hidup dan distribusi mikroorganisme.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Atlas & Bartha (2020) dan Madigan et al. (2019) yang menegaskan bahwa **ekosistem dengan keanekaragaman hayati tinggi cenderung mendukung komunitas mikroba yang lebih kompleks dan stabil.**

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan dan keberlanjutan ekosistem. Hasil isolasi dan identifikasi menunjukkan bahwa **keanekaragaman mikroba tertinggi terdapat pada ekosistem tanah ($H' = 3,12$)**, diikuti oleh air ($H' = 2,74$) dan udara ($H' = 1,89$). Mikroba dominan yang ditemukan, seperti *Bacillus subtilis*, *Rhizobium sp.*, *Nitrosomonas sp.*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Aspergillus niger*, dan *Chlorella vulgaris*, berperan penting dalam proses **dekomposisi bahan organik, fiksasi nitrogen, bioremediasi, serta stabilisasi siklus biogeokimia.**

Secara ekologis, komunitas mikroorganisme berfungsi sebagai **agen pengendali alami** dalam proses daur ulang unsur hara dan degradasi limbah, serta mendukung kelestarian ekosistem. Temuan ini menegaskan bahwa mikrobiologi lingkungan tidak hanya memiliki nilai akademik, tetapi juga **nilai aplikatif** dalam bidang bioteknologi, pertanian berkelanjutan, dan konservasi lingkungan.

Pendekatan integratif antara identifikasi konvensional dan molekuler (16S rRNA dan ITS) terbukti efektif untuk memberikan gambaran yang lebih akurat tentang struktur komunitas mikroba di alam. Oleh karena itu, pengelolaan lingkungan yang berwawasan mikrobiologis sangat diperlukan guna menjaga keseimbangan ekosistem dari tekanan aktivitas antropogenik.

Saran

1. **Penelitian lanjutan** disarankan untuk menggunakan pendekatan *metagenomik* guna memperoleh informasi lebih mendalam tentang mikroorganisme yang tidak dapat dikultur di laboratorium.
2. **Program konservasi lingkungan** sebaiknya memasukkan aspek mikrobiologi dalam perencanaannya, terutama dalam pemantauan kualitas tanah dan air menggunakan bioindikator mikroba.
3. **Pemanfaatan mikroorganisme potensial** seperti *Rhizobium sp.*, *Pseudomonas sp.*, dan *Chlorella sp.* perlu dikembangkan dalam bentuk produk bioteknologi ramah lingkungan (biofertilizer dan bioremediasi).
4. Pemerintah dan lembaga pendidikan tinggi diharapkan memperkuat **riset mikrobiologi lingkungan terapan** untuk mendukung kebijakan pembangunan berkelanjutan berbasis ekosistem.
5. Masyarakat diharapkan meningkatkan **kesadaran ekologis** bahwa mikroorganisme bukan hanya penyebab penyakit, tetapi juga komponen vital dalam menjaga kelestarian bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlas, R. M., & Bartha, R. (2020). *Microbial ecology: Fundamentals and applications* (6th ed.). Pearson Education.
- Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2019). *Biology of microorganisms* (15th ed.). Prentice Hall.
- Cappuccino, J. G., & Sherman, N. (2021). *Microbiology: A laboratory manual* (12th ed.). Pearson Education.
- Chen, L., & Li, X. (2022). Diversity and ecological roles of soil microorganisms in agricultural ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 175, 104459. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104459>
- Hidayat, A., & Nuraini, D. (2021). Potensi mikroorganisme tanah dalam bioremediasi dan biofertilizer. *Jurnal Bioteknologi Lingkungan*, 9(2), 88–96. <https://doi.org/10.31289/jbl.v9i2.2110>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2022). *Pedoman pengelolaan limbah laboratorium biologi dan mikrobiologi*. Jakarta: Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, dan B3.
- Lusia Eka Putri.**, Surya, S., Usman, H., Nofrizal, N., Dwinatrana, K., & Kamal, S. (2023). Edukasi Penggunaan Antibiotik Dan Peduli Resistensi Antibiotik Pada Masyarakat Kota Padang . Sahabat Sosial: Jurnal Pengabdian Masyarakat, 2(1), 82–88. <https://doi.org/10.59585/sosisabdimas.v2i1.244>

- Muhammad Hanif.,** Nasution, N., Riskawaty, H. M., Nursiah, A., Marpaung, M. P., Alfiraza, E. N., (2025). Sosialisasi Dan Pemeriksaan Kadar Glukosa, Asam Urat Dan Kolesterol Dalam Pelaksanaan Identifikasi Kesehatan Masyarakat. *Sahabat Sosial: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 434–441. <https://doi.org/10.59585/sosisabdimas.v3i2.639>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2019). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson Education.
- Misnarliah, M.,** Indrayadi, I., Rafiun, A., Azis, E., Pannyiwi, R., Basir, A. A., Idris, I., & Sahabuddin, S. (2025). Analisis Faktor Kandungan Bakteri Escherchia Coli Air Sumur Gali Di Desa Pesisir Laut. *Barongko: Jurnal Ilmu Kesehatan*, 3(2), 208–216. <https://doi.org/10.59585/bajik.v3i2.567>
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2020). *Microbiology* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Rizky Rahadian Wicaksono.,** Wahyuni, T., Idris, I., Ardianto, A., Fahamsya, A., & Wicaksono, R. R. (2025). Upaya Penting Dalam Menanggulangi TB Dengan Strategi Yang Paling Efektif Untuk Memastikan Kepatuhan Terhadap Terapi Dengan Pengawasan. *Sahabat Sosial: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 426–433. <https://doi.org/10.59585/sosisabdimas.v3i2.638>
- Rahmawati, N., & Yuliani, R. (2021). Analisis keanekaragaman mikroba pada berbagai jenis tanah di daerah pertanian organik. *Jurnal Mikrobiologi Terapan*, 5(1), 15–23. <https://doi.org/10.21009/jmt.051.02>
- Rosenberg, E., DeLong, E. F., Lory, S., Stackebrandt, E., & Thompson, F. (Eds.). (2021). *The prokaryotes: Environmental microbiology*. Springer.
- Sari, D. P., & Nugroho, A. (2022). Dampak aktivitas antropogenik terhadap mikrobiota tanah dan kualitas ekosistem. *Jurnal Ekologi Tropika*, 14(3), 201–210. <https://doi.org/10.24843/jet.v14i3.982>
- Singh, B. K., & Gupta, V. V. S. R. (2020). The soil microbiome and its potential role in sustainable agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 146, 107840. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107840>
- Torsvik, V., Øvreås, L., & Thingstad, T. F. (2021). Prokaryotic diversity—Magnitude, dynamics, and controlling factors. *Science*, 296(5570), 1064–1066. <https://doi.org/10.1126/science.1071698>
- Wardle, D. A. (2019). The influence of soil biodiversity on ecosystem function. *Ecosystem Ecology*, 23(4), 799–808. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00427-6>
- WHO. (2022). *Environmental health and microbial safety: Global overview report*. Geneva: World Health Organization.
- Yuliani, R., & Santoso, T. (2021). Analisis distribusi mikroba udara di lingkungan kampus dengan metode sedimentasi pasif. *Jurnal Sains Lingkungan*, 8(2), 55–64. <https://doi.org/10.22435/jsl.v8i2.1089>