© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1409-1417 *ISSN 1829-8907*

Pengaruh Induksi *Bacillus cereus* RTKS terhadap Respon Pertumbuhan Vegetatif *Pteris vittata L.* pada Media *Spent Ore* Pertambangan Emas

Elitha Shekinah Gracia*, Tien Aminatun, Rania Nur Farida, Anna Rakhmawati, Sri Atun, Arifudin Idrus, La Ode Restel, dan Junaidi Kwarta

Biologi, Universitas Negeri Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia; e-mail: elithashekinah.2022@student.uny.ac.id

ABSTRAK

Aktivitas pertambangan emas di Tumpang Pitu, Banyuwangi menghasilkan produk samping berupa *spent ore* dalam jumlah besar. Produk samping tersebut merupakan hasil dari proses sianidasi yang bersifat basa dan masih mengandung berbagai mineral. Berdasarkan karakteristik tersebut, *spent ore* tidak dapat dibawa keluar area pertambangan sehingga membentuk tumpukan di lokasi tersebut. Meskipun demikian, kondisi ekstrem tersebut tetap dapat menjadi habitat bagi tumbuhan perintis seperti *Pteris vittata L.*, meskipun tanaman kerap mengalami perubahan morfologis akibat cekaman lingkungan. Untuk mengatasi hal tersebut, dibutuhkan bakteri yang mampu menunjang pertumbuhan dan meningkatkan toleransi tanaman, seperti bakteri *Bacillus cereus* RTKS. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh induksi *Bacillus cereus* RTKS terhadap respons pertumbuhan vegetatif *Pteris vittata L.* pada media *spent ore* Pertambangan Emas Tumpang Pitu, Banyuwangi. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 4 taraf perlakuan dan 3 ulangan. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, biomassa, serta parameter klimatik-edafik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS memberikan pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman, ditunjukkan oleh kemunculan daun baru dengan nilai signifikansi $p < 0{,}001$. Perlakuan terbaik diperoleh pada kombinasi *Pteris vittata* dan *Bacillus cereus* RTKS tanpa penambahan kompos, dengan tinggi tanaman mencapai 17 cm dan jumlah daun sebanyak 4,1 helai. Selain itu, biomassa pada perlakuan tersebut menunjukkan hasil paling tinggi, yakni sebesar 3,73 gram pada tajuk dan 7,28 gram pada akar. Hasil ini mengindikasikan bahwa induksi rizobakteri efektif dalam menunjang performa pertumbuhan vegetatif *Pteris vittata L.* pada media cekaman *spent ore*.

***Kata kunci*:** *Pteris vittata*, *Bacillus cereus*, *Phytomining, Spent ore,* Emas

ABSTRACT

Gold mining activities in Tumpang Pitu, Banyuwangi, produce large quantities of waste material in the form of spent ore. This by-product is the result of the cyanidation process, which is alkaline and still contains various minerals. Due to these characteristics, spent ore cannot be removed from the mining area, thus forming stockpiles within the site. Nevertheless, these conditions can still serve as a habitat for pioneer plants. However, pioneer plants such as *Pteris vittata L.* often experience morphological changes due to living under heavy metal stress conditions. To address this issue, bacteria capable of supporting plant growth and enhancing stress tolerance are required, such as *Bacillus cereus* RTKS. Therefore, this study aimed to determine the effect of *Bacillus cereus* RTKS induction on the vegetative growth response of *Pteris vittata L.* cultivated in the spent ore area of the Tumpang Pitu Gold Mine, Banyuwangi. The study was conducted experimentally using a Completely Randomized Design (CRD) with bacterial induction and control treatments across 4 treatment levels and 3 replications. *Pteris vittata L.* was cultivated in the spent ore area with bacterial induction and variations in compost application, while the parameters observed in this study included plant height, biomass, and edaphic–climatic factors. The results showed that the induction of *Bacillus cereus* RTKS had a significant effect on the growth of *Pteris vittata*, as indicated by the emergence of new leaves with a significance level of $p < 0.001$. The best treatment was obtained from *Pteris vittata L.* combined with *Bacillus cereus* RTKS without compost addition, resulting in a plant height of 17 cm and an average leaf number of 4.1. Furthermore, the biomass in this treatment showed the highest results, namely 3.73 grams in the shoots and 7.28 grams in the roots. These results indicate that rhizobacterial induction is effective in supporting the vegetative growth performance of *Pteris vittata L.* in spent ore stress media.

***Keywords*:** *Pteris vittata*, *Bacillus cereus*, *Phytomining, Spent ore,* Gold

Citation: Gracia, E. S., Aminatun, T., Farida, R. N., Rakhmawati, A., Atun, S., Idrus, A., Restel, L. O., dan Kwarta, J. (2026). Pengaruh Induksi *Bacillus cereus* RTKS terhadap Respon Pertumbuhan Vegetatif *Pteris vittata L.* pada Media *Spent Ore* Pertambangan Emas. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1409-1417, doi:10.14710/jil.24.6.1409-1417

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu produsen emas terbesar di dunia. Hal ini menyebabkan banyaknya kegiatan pertambangan emas yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia. Salah satu kegiatan pertambangan emas berada di daerah Tumpang Pitu, Banyuwangi. Di pertambangan emas Tumpang Pitu, untuk mengekstraksi emas dari material (*ore*) menggunakan metode sianidasi. Sianidasi merupakan proses ekstraksi bijih emas dari material (ore) menggunakan sianida. Proses sianidasi ini mampu mengekstraksi emas hingga >85% sehingga proses ini menjadi salah satu pilihan karena tingginya efektivitas yang dihasilkan (Drace *et al*., 2016; Marshall *et al*., 2020).

Proses tersebut menghasilkan produk samping, berupa *spent ore*. Menurut Yusuf (2016), *spent ore* merupakan material batuan sisa yang bersifat basa dan masih mengandung berbagai mineral dari proses *leaching* dengan sianida. Berdasarkan karakteristik tersebut, *spent ore* tidak dapat dibawa keluar dari area pertambangan sehingga membentuk tumpukan di area pertambangan. Meskipun demikian, kondisi tersebut tetap dapat menjadi habitat bagi tumbuhan perintis, seperti paku-pakuan. Jenis paku-pakuan yang ditemukan di area tersebut adalah *Pteris vittata L*.

Menurut Sahara & Amintarti (2025), tumbuhan *Pteris vittata L*. merupakan tumbuhan perintis yang mampu bertahan di berbagai kondisi lingkungan sehingga banyak dijumpai di berbagai tempat. *Pteris vittata L*. juga berperan sebagai organisme penyusun ekosistem awal yang juga memiliki peranan untuk mencegah erosi, membantu pelapukan pembentukan serasah, dan vegetasi penutup tanah (Steenis, 2010; Ferdiana & Rizka, 2024).

Tumbuhnya *Pteris vittata L*. pada media *spent ore* menunjukkan tingginya toleransi tumbuhan ini terhadap cekaman logam berat. Media *spent ore* masih mengandung berbagai logam berat yang tentunya berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman. Menurut Savitri & Purwanti (2025), perubahan morfologi pada tanaman menjadi sebuah respon ketika tanaman terpapar logam berat yang dapat memengaruhi pertumbuhannya. Pertumbuhan dari tanaman ini juga berkaitan dalam kemampuan tanaman dalam merespon logam berat yang ada di lingkungannya (Begum *et al*., 2022). Oleh karena itu, perubahan atau respon pada tanaman dapat diketahui dari bagian daun, batang, dan akar tanaman.

Respon pada bagian daun tanaman dapat ditunjukkan melalui perubahan warna dari hijau menjadi kekuningan hingga coklat. Hal ini menunjukkan adanya penurunan kadar klorofil dan kerusakan sel akibat efek toksik dari logam berat ke bagian daun (Begum *et al*., 2022). Tidak hanya daun, pada batang tanaman juga dapat menunjukkan respon berupa terhambatnya pembelahan dan pemanjang sel batang. Pada penelitian Savitri & Purwanti (2025), tanaman yang tumbuh di lingkungan yang mengandung logam berat akan memproduksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang dapat merusak membran sel batang dan menurunkan kemampuan tanaman. Pada bagian akar tanaman yang berinteraksi erat dengan logam berat juga akan menunjukkan perubahan fisiologis dan metabolik, seperti inhibisi pertumbuhan akar, gangguan penyerapan, dan translokasi air, serta unsur hara. Dengan demikian, dibutuhkannya bakteri yang mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman logam berat.

Menurut Penelitian Aminatun *et al.* (2025), *Bacillus cereus* RTKS menjadi salah satu bakteri yang resisten terhadap lingkungan di pertambangan emas Ratatotok, Sulawesi Utara sehingga bakteri ini dapat digunakan dalam proses *bioleaching* emas. Tidak hanya itu, bakteri *Bacillus cereus* juga merupakan indikator biogeokimia emas dalam tanah sehingga dipastikan terdapat di area pertambangan emas (Lao *et al*., 2020). Bakteri ini juga termasuk ke dalam *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang telah diketahui mampu menghasilkan hormon *Indole Acetic Acid* (IAA). Hormon IAA berfungsi untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Kulkova *et al*., 2023). Selain itu, bakteri ini juga mampu mengurangi stres melalui aktivitas ACC-deaminase dan juga memiliki kemampuan sebagai agen pengkelat (*chelating agents*) dengan memproduksi siderofor (Vasques *et al*. 2024). Adanya siderofor berperan untuk meningkatkan transportasi logam berat dari lingkungan ke jaringan. Dengan demikian, adanya induksi *Bacillus cereus* RTKS di area rizosfer diharapkan memberikan meningkatkan toleransi dalam menunjang ketahanan hidupnya di kondisi cekaman logam berat.

Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan yang sudah dilakukan dari tahun 2022-2024 oleh Aminatun *et al*. (2022-2024). Penelitian ini dimulai dari eksplorasi berbagai jenis vegetasi hingga isolasi dan karakterisasi bakteri rizosfer di area pertambangan emas. Penelitian secara langsung atau insitu di area pertambangan emas penting untuk dilakukan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui respon tumbuhan lokal yang diinduksi dengan rizobakteria di lingkungan yang mengandung logam berat secara langsung. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS terhadap respon pertumbuhan vegetatif tanaman *Pteris vittata L*. yang ditanam di area *spent ore* Pertambangan Emas Tumpang Pitu, Banyuwangi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri dari 4 perlakuan dan 3 ulangan, sebagai berikut:

Kontrol : *Pteris vittata* + *Spent ore*
PBK1 : *Pteris vittata* + *Bacillus cereus* RTKS + *Spent ore* + Kompos (1:1)
PBK2 : *Pteris vittata* + *Bacillus cereus* RTKS + *Spent ore* + Kompos (2:1)
PBK3 : *Pteris vittata* + *Bacillus cereus* RTKS + *Spent ore*

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

2.1. Tempat dan Waktu

Penelitian dilaksanakan di Pertambangan Emas Tumpang Pitu, Banyuwangi dari 15 Juli 2025 hingga 13 September 2025 di bay 4C-RL 146. Pembuatan suspensi bakteri dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi, Universitas Negeri Yogyakarta. Eksplorasi tanaman *Pteris vittata L*. dilakukan di area *Heap Leach Operation* (HLO). Uji biomassa *Pteris vittata L.* dilakukan di Laboratorium Leco, *Adsorption Desorption Recovery* (ADR). Uji determinasi tanaman dilakukan di Fakultas Biologi, Universitas Gadjah Mada.

2.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan meliputi, tabung reaksi, tabung erlenmeyer, botol jam, ose kolong, autoklaf, *laminar air flow* (LAF), *furnace*, vortex, spektrofotometer, *hotplate stirrer,* mikropipet, bunsen, sarung tangan, sekop, palu, gelas ukur plastik, masker, karung, mortar, pestle, spatula, crucible, termometer tanah, hygrometer, *soil tester*, dan penggaris.

Bahan yang digunakan meliputi, NaCl 0,85%, Nutrient Agar (oxoid), alkohol, aquadest, plastik wrap, magnet, kertas payung, aluminium foil, karet, suspensi bakteri *Bacillus cereus* RTKS, tanaman *Pteris vittata,* sekam, pupuk kompos, *spent ore, polybag*, papan penanda, plastik 1kg, plastik klip, air, dan tisu.

2.3. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian ini adalah meremajakan isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS dengan menumbuhkannya di media NA slant. Selanjutnya, pembuatan suspensi bakteri dilakukan dengan NaCl 0,85% steril yang dituang ke media NA slant dan dikerik dengan ose kolong, lalu divortex agar homogen. Tanaman *Pteris vittata L*. yang digunakan memiliki umur sekitar 1 bulan atau berkisar 5-6 daun.

Pembuatan media tanam untuk aklimatisasi *Pteris vittata* menggunakan tanah dan pupuk kompos dengan perbandingan 1:1. Aklimatisasi dilakukan selama 7 hari di *greenhouse* PT. Bumi Suksesindo.

Setelah 7 hari aklimatisasi, tanaman dipindahkan dan ditanam ke area *spent ore* sesuai dengan perlakuan masing-masing. Induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS dilakukan di area perakaran untuk merangsang pertumbuhan tanaman. *Pteris vittata L*. yang sudah ditanam diamati selama 8 minggu dan disiram setiap harinya agar kebutuhan air terpenuhi.

2.4. Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan tiap seminggu sekali dengan memperhatikan parameter yang berpengaruh, seperti parameter edafik, mikroklimatik, dan performa tanaman.

2.4.1. Parameter Edafik

Parameter edafik yang diamati adalah pH tanah, kelembapan tanah, dan suhu tanah. Untuk mengetahui parameter tersebut diukur menggunakan alat *soil tester* dan termometer tanah.

2.4.2. Parameter Mikroklimatik

Parameter mikroklimatik yang diamati adalah curah hujan, laju penguapan, lama penyinaran matahari, suhu udara, dan indeks UV. Parameter ini dipantau oleh divisi monitoring PT. Bumi Suksesindo.

2.4.3. Parameter Performa Tanaman

Parameter yang diamati pada performa tanaman, antara lain tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa tanaman, respon morfologis tanaman berupa klorosis dan nekrosis. Tinggi tanaman diamati menggunakan penggaris dan jumlah daun, serta klorosis nekrosis dihitung tiap daunnya. Biomassa tanaman diketahui melalui berat basah dan berat kering dari bagian tajuk dan akar.

2.5. Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan analisis deskriptif kuantitatif. Menurut Sugiyono (2013), analisis deskriptif kuantitatif adalah penggunaan statistik deskriptif yang menjawab rumusan masalah deskriptif. Data hasil dari statistik deskriptif dan statistik inferensial dapat disajikan dalam bentuk tabel, grafik, atau diagram yang nantinya akan dianalisis dalam bentuk deskriptif. Dengan demikian, analisis performa tanaman *Pteris vittata L*. hanya akan dilakukan pada deskripsi kondisi parameter mikroklimatik, parameter edafik, dan parameter performa tanaman yang bertujuan untuk mencari hubungan sebab-akibat.

Pertama, uji yang dilakukan adalah uji Kolmogorov-Smirnov untuk parameter tinggi tanaman dan jumlah daun. Uji ini bertujuan untuk mengetahui data dari seluruh variabel terdistribusi secara normal. Kedua, uji homogenitas dan ANOVA dengan taraf signifikansi sebesar 0,05. Analisis One-Way ANOVA digunakan untuk membandingkan perbedaan rata-rata perlakuan, yang kemudian dilanjutkan dengan uji beda nyata jika menunjukkan hasil yang signifikan. Pada parameter biomassa tanaman, dilakukan uji lanjutan, yaitu uji Tukey dan Duncan untuk mengetahui kelompok perlakuan yang memiliki perbedaan secara nyata.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Performa *Pteris vittata L.*

Penggunaan *Pteris vittata L*. pada penelitian ini merupakan hasil dari pemilihan penelitian sebelumnya. Pada penelitian Aminatun *et al.* (2024), menyatakan bahwa tanaman *Pteris vittata L*. merupakan tanaman hiperakumulator dan tanaman perintis yang memiliki *Bioconcentration Factor* (BCF) sehingga tergolong ke kategori sedang (BCF1>0,1-1,0). Dengan demikian, *Pteris vittata L*. termasuk ke dalam tanaman hiperakumulator sedang. Tidak hanya itu, *Pteris vittata L*. juga mampu hidup di kondisi

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

lingkungan yang tidak ideal sebagai tanaman perintis (Steenis, 2010; Ferdiana & Rizka, 2024).

Area *spent ore* menjadi lingkungan yang tidak ideal bagi pertumbuhan tanaman, tetapi *Pteris vittata L.* tetap dapat ditemukan dan tumbuh di area tersebut. Berdasarkan kemampuannya sebagai tanaman hiperakumulator dan tanaman perintis, performa *Pteris vittata L.* dapat diketahui melalui tinggi tanaman, jumlah daun, biomassa tanaman, respon vegetatifnya. Ketiga parameter performa tersebut berkaitan dengan induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS ke area rizosfer. Untuk mengetahui apakah terdapat pengaruh nyata dari induksi bakteri terhadap performa *Pteris vittata L.* dilakukan pengujian statistik *Analysis of Variance* (ANOVA).

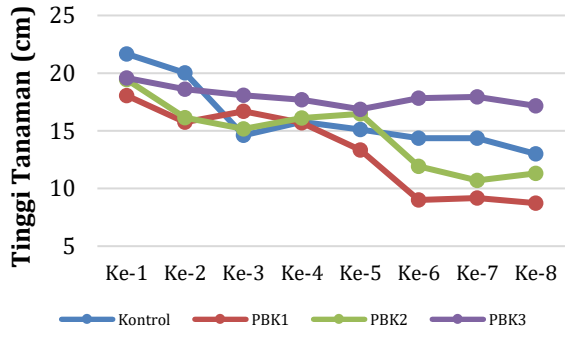
Tabel 1. Uji Statistik

Parameter Performa	F	Sig.
Tinggi	3,772	0,022
Jumlah Daun	5,001	<0,001

Berdasarkan hasil pada **Tabel 1**, adanya induksi bakteri berpengaruh secara signifikan pada tinggi dan jumlah daun (p<0,05). Hal ini menunjukkan bahwa *Bacillus cereus* RTKS berperan aktif dalam mendukung pertumbuhan *Pteris vittata L.* Hal ini sejalan dengan Penelitian Kulkova *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa *Bacillus cereus* termasuk ke dalam kelompok *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang mampu menyintesis hormon *Indole Acetic Acid* (IAA). Hormon ini mampu merangsang pemanjangan sel dan pembelahan sel. Dengan demikian, secara statistik dapat diketahui pada peningkatan tinggi tanaman dan jumlah daun.

3.1.1. Tinggi Tanaman

Pengukuran tinggi tanaman dilakukan dengan mengukur panjang dari pangkal batang hingga ujung daun tertinggi. Pengukuran ini dilakukan setiap satu minggu sekali.



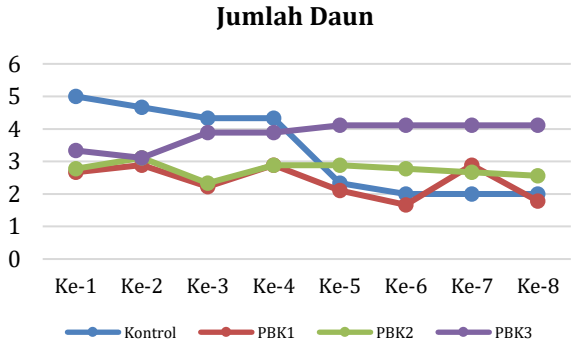
Gambar 1. Grafik Tinggi Tanaman

Berdasarkan grafik tersebut, tinggi tanaman terbaik diperoleh PBK3 dari minggu ke-1 hingga ke-8 yang selanjutnya diikuti oleh kontrol PBK2 dan PBK1. Secara umum, seluruh perlakuan mengalami penurunan tinggi tanaman. Hal ini terjadi karena tanaman mengalami stres akibat logam berat. Akibatnya, metabolisme tanaman terganggu sehingga menghambat pembelahan dan pemanjangan sel yang mengakibatkan penurunan tinggi tanaman (Wang *et al.*, 2024). Menurut Vijay *et al.* (2025), tanaman yang tidak mampu menahan stres terhadap logam berat akan mengganggu pertumbuhan tanaman sehingga menyebabkan tanaman menjadi kerdil. Dengan demikian, induksi *Bacillus cereus* RTKS pada perlakuan PBK3 mampu mengurangi stres dibandingkan dengan perlakuan lainnya.

Pada perlakuan PBK1 dan PBK2, diduga induksi *Bacillus cereus* RTKS tidak optimal akibat adanya kompetisi pemanfaatan nutrisi dengan mikroba lain di dalam kompos (Suryarmana *et al.*, 2022). Tidak optimalnya hal tersebut menjelaskan bahwa meskipun seluruh perlakuan mengalami tekanan pertumbuhan, PBK3 tetap menunjukkan tinggi tanaman terbaik dan signifikan secara statistik ($p = 0{,}022$) dibandingkan dengan perlakuan lainnya.

3.1.2. Jumlah daun

Pada penelitian ini, *Pteris vittata L.* yang digunakan memiliki keseragaman pada jumlah daun, yaitu 5-6 daun.



Gambar 2. Grafik Jumlah Daun

Berdasarkan hasil di atas diketahui bahwa jumlah daun menunjukkan penurunan pada perlakuan Kontrol, PBK1, dan PBK2. Pada perlakuan PBK3 mengalami peningkatan yang diindikasikan berkaitan dengan adanya induksi *Bacillus cereus* RTKS. Menurut Vasques *et al.* (2024), hormon *Indole Acetic Acid* (IAA) dan enzim ACC-deaminase yang diproduksi oleh *Bacillus cereus* berperan ganda untuk memicu pertumbuhan organ baru dan meningkatkan toleransi terhadap cekaman logam.



Gambar 3. Daun Muda PBK3

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Temuan daun muda melingkar (*fiddlehead*) di perlakuan PBK3 semakin menunjukkan bahwa perlakuan ini memiliki toleransi yang tinggi terhadap cekaman logam berat. Menurut Kurniawan *et al*. (2021), tanaman yang tetap menunjukkan pertumbuhan di lingkungan yang tidak ideal tersebut memiliki kemampuan adaptasi yang baik. Padahal, pertumbuhan tunas baru di lingkungan yang mengandung logam berat, sulit untuk dilakukan karena sifat toksik dari logam tersebut (Hilmi *et al*., 2018). Dengan demikian, perlakuan PBK3 menunjukkan bahwa induksi *Bacillus cereus* RTKS memiliki pengaruh yang nyata terhadap pertumbuhan *Pteris vitatta.*

3.1.3. Respon Morfologis Tanaman

Pengamatan respon morfologis tanaman dilakukan dengan mengamati klorosis dan nekrosis pada *Pteris vittata L*.. Berikut merupakan respon morfologis yang ditunjukkan oleh perlakuan PBK3 dengan perbandingan minggu ke-1 dan minggu ke-8:



Gambar 4. PBK3 Minggu ke-1



Gambar 5. PBK3 Minggu ke-8

Berdasarkan Gambar 4 dan 5, pada minggu ke-1 daun masih memiliki warna hijau lebih banyak dibandingkan dengan warna coklat yang mengindikasikan adanya klorosis. Namun, pada minggu ke-8, daun yang sebelumnya berwarna hijau mengalami perubahan menjadi kekuningan hingga coklat dan menggulung. Warna coklat dan menggulung ini disebabkan oleh stres akibat akumulasi logam berat pada jaringan (Fatiha *et al*., 2025). Dengan demikian, peningkatan klorosis tersebut menunjukkan bahwa *Pteris vittata L*. mengalami peningkatan stres fisiologis.

Peningkatan stres fisiologis ini bertambah seiring bertambahnya waktu paparan terhadap logam berat. Menurut Suman *et al.* (2018), peningkatan translokasi logam berat juga meningkatkan stres fisiologis pada tanaman. Hal ini terjadi karena proses translokasi ini melintasi membran sitoplasma yang menentukan kemampuan hiperakumulasi. Maka dari itu, semakin besar akumulasi dan translokasi logam berat yang terjadi dalam jaringan *Pteris vittata L*. semakin tinggi pula beban stres yang diterima tanaman. Dengan peningkatan klorosis tersebut menunjukkan bahwa *Pteris vittata L*. mengalami peningkatan stres fisiologis.



Gambar 6. Kondisi *Curling*

Berdasarkan gambar di atas menunjukkan perubahan morfologis daun menjadi warna kecoklatan dan ujung daun yang menggulung. Perubahan bentuk ujung daun menjadi menggulung merupakan akibat dari maksimalnya akumulasi logam pada vakuola. Salah satu fungsi vakuola adalah menjaga tekanan turgor yang mampu membuat daun tetap tegak. Namun, di lingkungan yang mengandung logam, adanya ion logam toksis di sitosol mengganggu keseimbangan osmotik dan homeostasis ionik di dalam sel tanaman. Gangguan ini menyebabkan sel kehilangan kemampuan untuk mempertahankan air sehingga tekanan turgor menurun dan sel menjadi flaksid (Sharma *et al*., 2016).

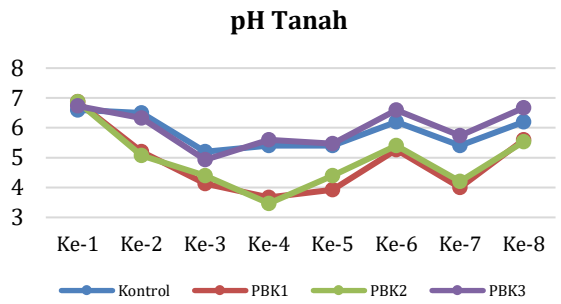
Menurunnya tekanan turgor ini berkaitan erat dengan kerusakan membran sel akibat stres yang akan membentuk ROS. ROS yang menyerang lipid penyusun membran akan menyebabkan membran menjadi bocor. Hal ini menyebabkan elektrolit dan air keluar dari dalam sel sehingga sel kehilangan turgiditas dan mengerut. Oleh karena itu, daun berubah menjadi menggulung untuk mengurangi luas permukaan dan meminimalisir transpirasi lebih lanjut (Mishra *et al*., 2017).

Kondisi ini juga sejalan dengan penelitian Raza *et al*. (2020), mengenai respon tanaman yang menyerap logam Cadmium (Cd) menyatakan bahwa, terdapat mekanisme yang digunakan oleh tanaman yang hidup di lingkungan yang mengandung logam berat. Mekanisme ini disebut sebagai sekuesterasi. Sekuesterasi merupakan proses regulasi yang memungkinkan tanaman mengangkut dan mengakumulasikan logam. Hal ini dianggap sebagai mekanisme adaptif yang penting bagi tanaman untuk bertahan dari stres logam dan kerusakan sel tanaman hiperakumulator dengan menampung logam tersebut di vakuola. Namun, jika logam dalam vakuola telah melampaui kapasitas vakuola, maka akibat yang terjadi adalah kerusakan pada sel tanaman. Hal inilah yang mengakibatkan perubahan pada ujung daun *Pteris vittata L*. Kondisi *curling* ini terjadi pada seluruh perlakuan tanaman.

3.2. Parameter Edafik

Parameter edafik yang diamati adalah pH tanah, suhu tanah, dan kelembapan tanah. Ketiga parameter ini berkaitan dalam menunjang kondisi ideal pertumbuhan *Bacillus cereus* RTKS di area rizosfer dan pertumbuhan *Pteris vittata L*.

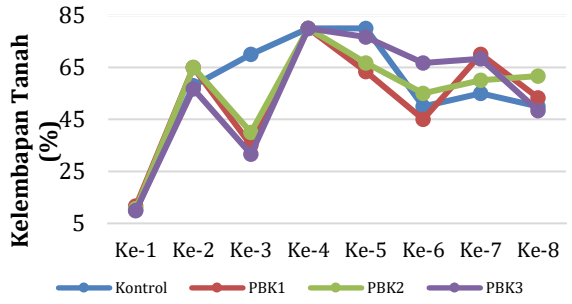
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 7. Grafik pH Tanah

Pada minggu ke-1, seluruh perlakuan menunjukkan pH yang serupa. Namun, pada minggu ke-2 hingga ke-4 terjadi penurunan yang signifikan pada perlakuan PBK1 dan PBK2. Hal ini terjadi karena adanya penambahan kompos pada *spent ore* sebagai media tanam. Menurut Xu *et al*. (2023), kompos yang ditambahkan pada tanah bersifat basa mampu menurunkan kebasaan tanah. Dengan demikian, sifat basa pada *spent ore* mengalami penurunan karena adanya penambahan kompos sebagai media tanam.

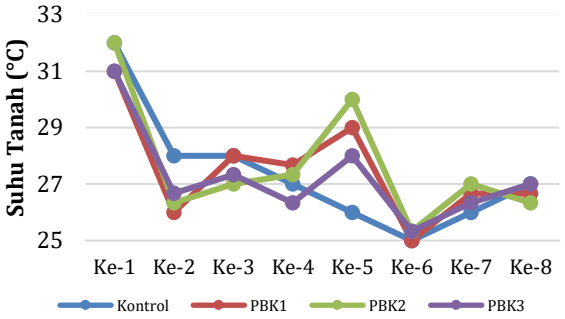
Bacillus cereus dapat hidup secara optimal di kondisi pH netral hingga basa (Ehling-Schulz *et al*., 2019). Pertumbuhan bakteri secara optimal dapat meningkatkan kemampuannya dalam memproduksi hormon IAA dan siderofor. Maka dari itu, dapat diketahui pada perlakuan PBK3 menunjukkan pH yang mendukung pertumbuhan *Bacillus cereus* RTKS. Dengan demikian, bakteri tersebut dapat memproduksi hormon IAA dan siderofor secara maksimal.



Gambar 8. Grafik Kelembapan Tanah

Berdasarkan grafik tersebut menunjukkan fluktuatifnya kelembapan yang terkandung pada tanah. Hal ini terjadi karena tingginya laju penguapan yang terjadi di lokasi penelitian. Untuk menjaga kelembapan tanah, penyiraman dengan air dilakukan setiap harinya. Penyiraman ini berfungsi untuk mendukung pertumbuhan *Pteris vittata L*. Pada perlakuan PBK1 dan PBK2, menunjukkan hasil yang paling unggul di minggu ke-8. Adanya penambahan kompos sebagai media tanam mampu menjaga kelembapan tanah di perlakuan tersebut. Menurut Lase (2025), kompos mampu meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air sehingga kelembapan tanah akan meningkat. Dengan demikian, penggunaan kompos efektif untuk menjaga kelembapan tanah di perlakuan tersebut.

Tidak hanya penggunaan kompos saja yang berperan dalam menjaga kelembapan tanah. Hujan yang terjadi di lokasi penelitian juga membantu memenuhi kebutuhan air pada tanah. Menurut Saputri & Ami (2021), adanya air dari lingkungan mendukung anteridium berpindah lokasi ke kepala arkegonium *Pteris vittata L*. Dengan demikian, pembuahan terjadi sehingga membentuk individu baru.



Gambar 9. Grafik Suhu Tanah

Suhu tanah dipengaruhi oleh suhu udara, penyinaran matahari, cuaca harian, aktivitas mikroba. Aktivitas mikroba dalam mengurai bahan organik akan menghasilkan dan mengakumulasikan penyaluran panas dari permukaan tanah (Ziliwu & Lase, 2025). Namun, pada penelitian ini, suhu tanah lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan penelitian. Lingkungan penelitian memiliki kondisi laju penguapan yang tinggi, dapat dilihat di **Tabel 2**. Akibatnya, tanah yang sudah tersiram oleh air akan mudah mengalami kehilangan air karena penguapan yang terjadi. Tidak hanya itu, tanah yang tersiram air menjadi bentuk menyerupai lumpur sehingga ketika tanah tersebut kering akan mengeras di permukaannya. Kerasnya permukaan tanah ini menyebabkan suhu tanah menjadi rendah karena panas dari permukaan tidak mampu merambat ke lapisan tanah yang lebih dalam (Hadi & Purnomo, 2022). Dengan demikian, suhu tanah di lokasi penelitian cenderung rendah dari kondisi ideal yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman.

3.3. Parameter Mikroklimatik

Parameter mikroklimatik yang diamati adalah curah hujan, laju penguapan, lama penyinaran matahari, suhu udara, dan indeks UV. Parameter ini diperoleh dari area penelitian yang memiliki pengaruh terhadap perkembangan *Pteris vittata L*. dan pertumbuhan *Bacillus cereus* RTKS di rizosfer.

Rata-rata intensitas curah hujan di lokasi penelitian pada bulan Juli – September menunjukkan 4,82mm/hari. Menurut BMKG (2010), kriteria hujan ringan didefinisikan dengan adanya intensitas curah hujan 5-20 mm/hari. Dengan demikian, curah hujan yang terjadi di lokasi penelitian tergolong ke curah

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

hujan ringan. Meskipun ringan, curah hujan ini berperan dalam menunjang kebutuhan air untuk menjaga kelembapan tanah dan mendukung proses reproduksi *Pteris vittata L*.

Tabel 2. Mikroklimatik Juli-September

Mikroklimatik	Juli	Agustus	September	x̄
Rainfall (mm/day)	3,45	4,04	6,96	4,82
Evapotranspiration (mm/day)	189,41	264,86	528,59	325,43
Sunshine (hour/day)	4,23	4,76	4,64	4,54
Suhu (ºC)	25,18	25,50	25,99	25,55
Indeks UV	0,97	1,27	1,45	1,23

Sumber: Divisi Monitoring PT.Bumi Suksesindo

Lama penyinaran matahari, berkaitan dengan fotosintesis *Pteris vittata.* Dalam proses menyimpan energi tersebut, *Pteris vittata* membutuhkan sinar matahari untuk prosesnya. Namun, sinar matahari yang diterima secara harian tergolong sedang sehingga memengaruhi proses fotosintesis yang terjadi. Menurut Tania *et al*. (2024), lama penyinaran matahari memengaruhi durasi fotosintesis pada tanaman. Jika penyinaran matahari tidak memadai atau berlebihan akan berpengaruh pada kondisi tanaman tersebut. Dengan demikian, durasi penyinaran matahari menjadi faktor penting bagi fotosintesis *Pteris vittata.*

Menurut Fibriana *et al*. (2018), laju penguapan dipengaruhi oleh suhu udara dan indeks UV. Semakin tinggi suhu dan indeks UV, maka semakin tinggi laju penguapan yang terjadi. Berdasarkan **Tabel 2**, pada bulan September memiliki suhu sebesar 25,99ºC. Diketahui bahwa suhu pada bulan tersebut meningkat dibandingkan bulan Juli dan Agustus. Hal ini juga diikuti oleh peningkatan nilai indeks UV di bulan tersebut. Akibatnya, laju penguapan pada bulan September meningkat drastis dibandingkan bulan Juli dan Agustus. Tentunya, hal ini berdampak pada kelembapan tanah lokasi penelitian. Pada **Gambar 8**, minggu ke-7 dan ke-8 menunjukkan penurunan kelembapan tanah. Dengan demikian, hal tersebut memengaruhi kelembapan tanah dan kebutuhan air yang diperlukan *Pteris vittata L*.

3.4. Pengaruh Induksi *Bacillus cereus* RTKS

3.4.1. Biomassa Tanaman

Biomassa tanaman diperoleh dengan mengukur berat basah dan berat kering tanaman. Berat basah merupakan bobot tanaman ketika dipanen dalam kondisi segar dan belum kehilangan air. Sedangkan, berat kering merupakan bobot biomassa yang diserap oleh tanaman (Wagner, 1974; Afifudin *et al*., 2022). Menurut Larcher (yang dikutip oleh Afifudin *et al*., 2022), berat kering merupakan akumulasi bersih dari asimilasi CO_2 selama pertumbuhan dan perkembangan tanaman berlangsung. Dengan demikian, semakin baik tanaman tumbuh, maka berat keringnya semakin lebih besar. Tabel 3 merupakan hasil statistik berat basah dan kering pada bagian tajuk dan akar *Pteris vittata L*.

Tabel 3. Biomassa Tanaman

Kode	Tajuk (g)		Akar (g)	
	Berat basah	Berat kering	Berat basah	Berat kering
Kontrol	$3{,}09 \pm 0{,}39$	$2{,}38 \pm 0{,}79$	$4{,}36 \pm 1{,}10$	$1{,}56 \pm 0{,}49^{a}$
PBK1	$5{,}66 \pm 3{,}23$	$3{,}32 \pm 2{,}97$	$11{,}01 \pm 5{,}85$	$4{,}48 \pm 1{,}43^{ab}$
PBK2	$6{,}08 \pm 2{,}69$	$1{,}58 \pm 1{,}07$	$11{,}27 \pm 0{,}61$	$4{,}84 \pm 1{,}03^{ab}$
PBK3	$8{,}11 \pm 1{,}52$	$3{,}73 \pm 0{,}55$	$14{,}42 \pm 5{,}00$	$7{,}28 \pm 2{,}93^{b}$
F-value	2,534	1,020	3,532	5,539
Sig. (*p*-value)	0,130 (ns)	0,433 (ns)	0,068 (ns)	0,024*

*Keterangan: Angka diikuti oleh huruf superskrip yang berbeda pada kolom sama menunjukkan perbedaan yang signifikan berdasarkan uji lanjut Tukey/Duncan pada taraf $\alpha = 0{,}05$; ns = nonsignifikan; * = signifikan*

Berdasarkan uji One-Way ANOVA, pada bagian tajuk *Pteris vittata L*. adanya penambahan bakteri dan kompos tidak memberikan pengaruh yang signifikan (p>0,05), meskipun pada PBK3 menunjukkan peningkatan dibandingkan kontrol. Pada bagian berat basah akar *Pteris vittata L*. terdapat peningkatan yang mendekati taraf nyata (p = 0,068), di mana perlakuan PBK3 menunjukkan akumulasi berat basah tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Pada bagian berat kering akar, PBK3 juga menunjukkan hasil yang signifikan secara statistik (p = 0,024), hal ini membuktikan bahwa adanya efektivitas induksi bakteri dalam merangsang biomassa akar pada media *spent ore* tanpa adanya penambahan kompos.

Menurut Fasani (yang dikutip oleh Yan *et al*., 2020), adanya mikroba di area rizosfer mampu merangsang proliferasi akar sehingga mengaktifkan proses pembelahan sel bagian ujung akar. Akibatnya, sel-sel tersebut mengalami elongasi dan terdiferensiasi di jaringan akar sehingga akar bertambah panjang. Hal ini membuktikan bahwa bakteri *Bacillus cereus* RTKS berperan sebagai *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang memicu pertumbuhan jaringan tanaman (Raharjo *et al*., 2026). Tidak hanya itu, pada perlakuan PBK3 juga sejalan dengan penelitian Benidire *et al*. (2021), bahwa adanya PGPR dalam tanah dapat menggantikan peran pupuk kimia, pestisida, dan hormon pertumbuhan sehingga dapat meningkatkan panjang akar dan biomassa tanaman.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada desain perlakuan, di mana pengaruh kompos secara mandiri belum dapat dipisahkan secara mutlak karena ketiadaan perlakuan kontrol berupa kompos tanpa inokulasi bakteri. Oleh karena itu, interpretasi terhadap pengaruh kompos dalam penelitian ini bersifat komparatif berdasarkan kombinasi perlakuan yang diuji. Keterbatasan ini menjadi acuan penting untuk penyempurnaan desain eksperimental selanjutnya agar setiap faktor perlakuan dapat dievaluasi secara lebih spesifik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

berpengaruh signifikan terhadap respons pertumbuhan vegetatif tanaman *Pteris vittata L*. yang ditanam pada media *spent ore*. Perlakuan terbaik ditunjukkan oleh induksi bakteri tanpa penambahan kompos (PBK3), yang menghasilkan performa pertumbuhan optimal berupa tinggi tanaman (17 cm), jumlah daun (4,1 helai), serta berat kering biomassa tertinggi (3,73 g pada tajuk dan 7,28 g pada akar). Meskipun pertumbuhan vegetatif meningkat, tanaman pada seluruh perlakuan tetap menunjukkan respons morfologis berupa klorosis dan penggulungan daun (*curling*). Kondisi tersebut merupakan mekanisme adaptif sekuestrasi logam berat ke dalam vakuola sebagai respons tanaman terhadap cekaman lingkungan pada media *spent ore*. Secara keseluruhan, *B. cereus* RTKS terbukti efektif berperan sebagai *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dalam memacu pertumbuhan vegetatif sekaligus meningkatkan toleransi tanaman di lingkungan ekstrem pertambangan emas.

DAFTAR PUSTAKA

Afifudin, A. F. M., Agustina, E., Firdhausi, N. F., & Irawanto, R. (2022). Respon Tanaman Daun Tombak (Sagittaria lancifolia) Dalam Cekaman Logam Berat Tembaga (Cu). *Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains Dan Teknologi*, *7*(2), 87-93.

Alves, A. R., Oliveira, R. S., Silva, E. F., & Novo, L. A. (2021). Role of bacteria and mycorrhizal fungi in phytomining: status and future perspectives. *Microbe mediated remediation of environmental contaminants*, 15-26.

Al-Baldawi, I. A., Yasin, S. R., Jasim, S. S., Abdullah, S. R. S., Almansoory, A. F., & Ismail, N. I. (2022). Removal of copper by Azolla filiculoides and Lemna minor: phytoremediation potential, adsorption kinetics and isotherms. *Heliyon*, *8*(11).

Aminatun, T., Budiwati, B., Suhartini, S., & Raharjo, R. (2026). Effect of the combined application of rhizobacteria and compost on the ability of *Pteris vittata L*. as a phytoremediator for mercury in gold mine tailing. *Journal of Degraded and Mining Lands Management,* 13(1), 9597-9606

Aminatun, T., Idrus, A., Atun, S., Rakhmawati, A., Restele, L., & Simbolon, D. R. (2025). Bioleaching potential of local bacteria from gold mine tailings in the Ratatotok Area, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 201 208.

Aminatun, T., Rakhmawati, A., Atun, S., Idrus, A., Simbolon, D. R., & Restele, L. (2024). Characteristics of rhizobacteria in potential hyperaccumulator vegetation and their resistance to gold mine tailing stress. *Journal of Water and Land Development*, 209-218.

BMKG. (2010). *Kondisi Cuaca Ekstrem dan Iklim Tahun 2010-2011*. Jakarta. Retrieved from http://data.bmkg.go.id/Share/Dokumen/press release kondisi cuaca ekstrim dan iklim tahun 2010-2011.pdf

Begum, W., Rai, S., Banerjee, S., Bhattacharjee, S., Mondal, M. H., Bhattarai, A., & Saha, B. (2022). A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC advances*, 12(15), 9139-9153.

Benidire, L., Madline, A., Pereira, S. I. A., Castro, P. M. L., & Boularbah, A. (2021). Synergistic effect of organo-mineral amendments and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the establishment of vegetation cover and amelioration of mine tailings. *Chemosphere*, *262*, 127803.

Dang, P., & Li, C. (2022). A mini-review of phytomining. *International Journal of Environmental Science and Technology,* 19(12), 12825-12838.

Ehling-Schulz, M., Lereclus, D., & Koehler, T. M. (2019). The Bacillus cereus group: Bacillus species with pathogenic potential. *Microbiology spectrum*, *7*(3), 10-1128.

Fatiha, I. I., Firdhausi, N. F., & Zummah, A. (2025). Potensi Tumbuhan Melati Air (Echinodorus radicans) Terhadap Penurunan Kadar Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) Pada Limbah Cair Home Industry Batik di Desa Sendang Kabupaten Lamongan. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, *13*(1), 176-196.

Fibriana, R., Ginting, Y. S., Ferdiansyah, E., & Mubarak, S. (2018). Analisis besar atau laju evapotranspirasi pada daerah terbuka. *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, *2*(2), 130-137.

Hadi, A. N. K. R., & Purnomo, T. (2022). Potensi Cordyline fructicosa dan Sanseviera trifasciata Sebagai Agen Penyerapan Logam Berat Cd Pada Tanah. *LenteraBio: Berkala Ilmiah Biologi*, *11*(3), 359-368.

Hilmi, M., Hamim, H., Sulistyaningsih, Y. C., & Taufikurahman, T. (2018). Growth, histochemical and physiological responses of non-edible oil producing plant (*Reutealis trisperma*) to gold mine tailings. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, *19*(4), 1294-1302.

Kulkova, I., Dobrzyński, J., Kowalczyk, P., Bełżecki, G., & Kramkowski, K. (2023). Plant growth promotion using Bacillus cereus. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(11), 9759.

Kurniawan, R., Hamim, , Henny, C., & Satya, A. (2021). Identification of potential phytoaccumulator plants from tailings area as a gold phytomining agent. *Journal of Ecological Engineering*, *23*(1), 169-181.

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer Science & Business Media.

Lase, E. (2025). Pengaruh Pemberian Kompos Pada Kelembapan Tanah. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, *2*(1), 80-85.

Marshall, B. G., Veiga, M. M., da Silva, H. A., & Guimarães, J. R. D. (2020). Cyanide contamination of the puyango-tumbes river caused by artisanal gold mining in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Current Environmental Health Reports*, *7*(3), 303-310.

Minuţ, M., Vasilachi, I. C., Roşca, M., Comăniţă-Ungureanu, E. D., Bulgariu, L., Diaconu, M., ... & Gavrilescu, M. (2023). Phytomining and its role in improving soil quality and recovering some critical raw materials. *Ann Acad Roman Sci Ser Phys Chem*, *8*(2), 62-89.

Mishra, J., Singh, R., & Arora, N. K. (2017). Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms. *Frontiers in microbiology*, 8, 1706..

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Nagajyothi, G. N., Taj, A., Kavana, G. B., & Meghana, K. (2024). Review on Fern: A Fascinating Foliage. *Asian Journal of Environment & Ecology*, *23*(8), 97-118.

Raharjo, R., Aminatun, T., Suhartini, S., & Budiwati, B. (2026) Pengaruh Kombinasi Induksi Bacillus cereus RTKS dan Pupuk Kompos dalam Fitoremediasi Cemaran Merkuri oleh Ageratum conyzoides L. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, *25*(2), 152-163.

Raza, A., Habib, M., Kakavand, S. N., Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R., & Hasanuzzaman, M. (2020). Phytoremediation of cadmium: physiological, biochemical, and molecular mechanisms. *Biology*, 9(7), 177.

Rosyidah, N. F., & Rachmadiarti, F. (2023). *Salvinia molesta* sebagai Agen Fitoremediasi Logam Berat Zink (Zn) di Perairan. *LenteraBio: Berkala Ilmiah Biologi*, *12*(3), 430-438.

Sahara, S. J. J. K., & Amintarti, S. (2025). Keragaman tumbuhan paku (Pteridophyta) di hutan tropis Kalimantan Selatan. In *Seminar Nasional Pendidikan Biologi ULM* , 1, (2), 230-244.

Savitri, A. R., & Purwanti, I. F. (2025). Pengelolaan Reklamasi Lahan Pascatambang Nikel di Sulawesi Tenggara Menggunakan Fitoremediasi (Studi Kasus: PT. X). *Jurnal Serambi Engineering*, *10*(2)

Sharma, S. S., Dietz, K. J., & Mimura, T. (2016). Vacuolar compartmentalization as indispensable component of heavy metal detoxification in plants. *Plant, cell & environment,* 39(5), 1112-1126.

Siyar, R., Doulati Ardejani, F., Norouzi, P., Maghsoudy, S., Yavarzadeh, M., Taherdangkoo, R., & Butscher, C. (2022). Phytoremediation potential of native hyperaccumulator plants growing on heavy metal-contaminated soil of Khatunabad copper smelter and refinery, Iran. *Water*, *14*(22), 3597.

Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J., & Macek, T. (2018). Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment?. *Frontiers in plant science*, *9*, 1476.

Suryatmana, P., Meilani, J. F., Kamaluddin, N. N., & Simarmata, T. (2022). Potensi Kompos, tepung Azolla dan Dedak sebagai bahan Pembawa Bakteri Pemfiksasi N (BPN) dalam meningkatkan pertumbuhan dan hasil gabah Padi Gogo pada Inceptisols Jatinangor. *soilrens*, *20*(2), 86-94.

Susilo, F., & Siregar, R. N. (2024). *Panduan Pengenalan Tumbuhan Paku (Pteridophyta) Taman Kota Medan*. Medan: Penerbit NEM.

Tania, P., Juanda, B. R., & Azis, A. (2024). Korelasi Radiasi Dan Lama Penyinaran Matahari Terhadap Pertumbuhan Dan Produksi Tanaman Sorgum (Sorghum bicolor L. Moench). *Jurnal Agroqua: Media Informasi Agronomi dan Budidaya Perairan*, *22*(2), 120-133.

Titahena, M. F., Mariwy, A., & Sunarti, S. (2023). Studi Remediasi Tanah Tercemar Logam Merkuri (Hg) menggunakan Tumbuhan Teki (Cyperus Rotundus). *Jurnal Reka Lingkungan*, *11*(2), 95-104.

Vasques, N. C., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2024). Increasing application of multifunctional Bacillus for biocontrol of pests and diseases and plant growth promotion: lessons from Brazil. *Agronomy*, *14*(8), 1654.

Wagner, W. H. (1974). Pteridology, 1947-1972. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, *61*(1), 86-111.

Wang, N., Chen, H. & Tian, Y. (2024). Effects of nickel, lead, and copper stress on the growth and biochemical responses of *Aegilops tauschii* seedlings. *Sci Rep* 14, 24832

Widyasari, N. L. (2021). Kajian tanaman hiperakumulator pada teknik remediasi lahan tercemar logam berat. *Jurnal Ecocentrism*, *1*(1), 17-24.

Worotitjan, F. D., Pakasi, S. E., & Kumolontang, W. J. (2022). Teknologi pengomposan berbahan baku eceng gondok (Eichhornia crassipes) Danau Tondano. *Jurnal Agroekoteknologi Terapan*, *3*(1), 1-7.

Xu, D., Yu, X., Chen, J., Li, X., Chen, J., & Li, J. (2023). Effects of compost as a soil amendment on bacterial community diversity in saline–alkali soil. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1253415.

Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in plant science*, *11*, 513099.

Yusuf, F. (2016). Karakteristik Spent Ore Proses Heap Leach Single Stacking Berdasarkan Uji Xrd, Xrf Dan Mikroskop Bijih Terhadap Potensi Pembentukan Air Asam Tambang. *Jurnal Geomine*, *4*(3), 123-127.

Zhou, B., Yang, Z., Chen, X., Jia, R., Yao, S., Gan, B., ... & Chen, Y. (2024). Microbiological mechanisms of collaborative remediation of cadmium-contaminated soil with Bacillus cereus and lawn plants. *Plants*, *13*(10), 1303.

Ziliwu, Y. M., & Lase, N. K. (2025). Peran Mikroorganisme dalam Proses Degradasi Bahan Organik. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, *2*(1), 132-14.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP