

Pengaruh Kombinasi Induksi *Bacillus cereus* RTKS dan Pupuk Kompos dalam Fitoremediasi Cemaran Merkuri oleh *Ageratum conyzoides* L.

Rahmanto Raharjo^{1*}, Tien Aminatun¹, Suhartini¹, Budiwati¹

¹Departemen Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: rahmanto0139fmipa.2022@student.uny.ac.id



©2026. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Info Artikel: Diterima 28 Desember 2025 ; Direvisi 14 Juli 2026 ; Disetujui 20 Juli 2026

Tersedia online : 04 Agustus 2026 ; Diterbitkan secara teratur : Juni 2026



Cara sitasi: Raharjo R, Aminatun T, Suhartini, Budiwati. Pengaruh Kombinasi Induksi *Bacillus cereus* RTKS dan Pupuk Kompos dalam Fitoremediasi Cemaran Merkuri oleh *Ageratum conyzoides* L.. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2026 Jun ;25(2):152-163. <https://doi.org/10.14710/jkli.81048>.

ABSTRAK

Latar belakang: Aktivitas penambangan emas rakyat di Desa Paningkaban, Kabupaten Banyumas, pada area prospektif ±16.000 ha dengan sedikitnya 94 lubang tambang dan >1.500 penambang masih menggunakan metode amalgamasi yang menghasilkan tailing mengandung merkuri (Hg) dan berpotensi mencemari lingkungan. Fitoremediasi menggunakan tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) yang toleran terhadap Hg berpeluang menjadi solusi ramah lingkungan, namun efektivitasnya perlu ditingkatkan melalui penambahan pupuk kompos dan bakteri toleran logam *Bacillus cereus* RTKS. Penelitian ini bertujuan menganalisis kemampuan *Ageratum conyzoides* L. dalam meremediasi Hg pada tanah tailing pertambangan emas Desa Paningkaban dengan kombinasi pupuk kompos dan induksi *Bacillus cereus* RTKS.

Metode: Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang dilakukan pada Mei–Agustus 2025. Perlakuan berupa media tanah *tailing* tanpa dan dengan penambahan kompos (1:1) disertai induksi bakteri, dengan pengamatan pertumbuhan tanaman selama 9 minggu. Data konsentrasi merkuri (Hg) pada media tanam dan jaringan tanaman dianalisis deskriptif dengan TF dan BCF serta pertumbuhan tanaman dianalisis secara statistik menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA).

Hasil: Nilai BCF berkisar 0,01–0,2 dan TF <1, yang mengindikasikan bahwa *Ageratum conyzoides* L. berperan sebagai tanaman akumulator rendah dengan mekanisme fitostabilisasi. Analisis ANOVA ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa perlakuan tidak berpengaruh signifikan terhadap tinggi tanaman dan jumlah daun ($p > 0,05$), namun berpengaruh signifikan terhadap jumlah bunga ($p < 0,05$), yang mengindikasikan bahwa merkuri lebih memengaruhi fase generatif dibandingkan vegetatif tanaman.

Simpulan: Tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) mampu meremediasi merkuri pada tanah tailing emas melalui mekanisme fitostabilisasi sebagai tanaman akumulator rendah, ditunjukkan oleh penurunan Hg tanah, akumulasi pada akar, nilai BCF 0,01–0,1, dan TF <1. Penambahan kompos dan induksi *Bacillus cereus* RTKS tidak meningkatkan efektivitas secara signifikan.

Kata kunci: Fitoremediasi; Rhizobakteri; Pupuk Kompos; Merkuri

ABSTRACT

Title: *Effect of Bacillus cereus RTKS Induction and Compost Fertilizer Combination in Phytoremediation of Mercury Contamination with Ageratum conyzoides L.*

Background: Artisanal gold mining in Paningkaban Village, Banyumas Regency, covers a prospective area of approximately 16,000 ha with at least 94 mining pits and more than 1,500 miners, and still relies on amalgamation methods that generate mercury-containing tailings and pose serious environmental risks. Phytoremediation using bandotan (*Ageratum conyzoides* L.), a plant tolerant to mercury, offers an environmentally friendly approach, although its effectiveness may be enhanced through the addition of compost and the induction of the metal-tolerant bacterium *Bacillus cereus* RTKS. This study aimed to evaluate the ability of *Ageratum conyzoides* L. to remediate mercury (Hg) in gold-mining tailings from Paningkaban using compost amendment and *Bacillus cereus* RTKS induction.

Method: This experimental study employed a Completely Randomized Design and was conducted from May to August 2025. Treatments consisted of tailings soil with and without compost addition (1:1) combined with bacterial induction, and plant growth was observed for nine weeks. Mercury concentrations in the growth media and plant tissues were analyzed descriptively using bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF), while plant growth parameters were analyzed statistically using ANOVA.

Result: BCF values ranged from 0.01 to 0.2 and TF values were <1 , indicating that *A. conyzoides* L. functions as a low accumulator through a phytostabilization mechanism. ANOVA ($\alpha = 0.05$) showed no significant effects of treatments on plant height and leaf number ($p > 0.05$), but a significant effect on flower number ($p < 0.05$), suggesting that mercury more strongly affects the generative phase than the vegetative phase.

Conclusion: *Ageratum conyzoides* L. is capable of remediating mercury in gold-mining tailings through phytostabilization as a low-accumulator plant, as indicated by reduced soil Hg, root accumulation, BCF values of 0.01–0.1, and $TF < 1$. Compost addition and *B. cereus* RTKS induction did not significantly enhance remediation effectiveness.

Keywords: *Phytoremediation; Rhizobacteria; Compost fertilizer; Mercury*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan kekayaan mineral terbesar di dunia karena berada pada zona pertemuan Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia yang membentuk rangkaian busur magmatik aktif dari Sunda–Banda hingga Papua.¹ Kondisi geologi tersebut menjadikan Indonesia sebagai produsen emas global dengan produksi mencapai 117,5 ton pada tahun 2021.² Salah satu wilayah yang memiliki potensi emas signifikan adalah Desa Paningkaban, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, dengan area prospektif sekitar 16.000 hektar pada jalur endapan aluvial Gunungapi Slamet.³ Aktivitas penambangan rakyat berkembang pesat sejak 2007 dan saat ini sedikitnya terdapat 94 lubang tambang dengan lebih dari 1.500 penambang aktif.⁴

Praktik penambangan emas tradisional di wilayah tersebut masih mengandalkan metode amalgamasi, yaitu proses pemisahan emas melalui pencampuran bijih dengan merkuri (Hg).⁴ Limbah pengolahan (*tailing*) yang dihasilkan seringkali dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan, sehingga memicu pencemaran tanah, air tanah, dan perairan sungai. Merkuri merupakan logam berat yang bersifat toksik, persisten, serta mudah mengalami bioakumulasi pada rantai makanan akuatik, sehingga meningkatkan risiko terhadap organisme perairan dan kesehatan manusia.⁵ Di Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, akumulasi Hg telah terdeteksi pada sedimen, tanah, air permukaan, dan air tanah, dan telah menimbulkan perubahan bentang lahan serta kerusakan infrastruktur.⁴

Upaya remediasi *tailing* tambang yang mengandung logam berat kini banyak diarahkan pada pendekatan ramah lingkungan seperti fitoremediasi. Fitoremediasi memanfaatkan tanaman hiperakumulator untuk menyerap, mentranslokasikan, atau menstabilkan polutan logam berat di dalam jaringan tanaman.⁶ Indonesia sebagai negara megabiodiversitas memiliki banyak spesies toleran logam berat yang berpotensi digunakan untuk fitoremediasi.⁷ Salah satu di antaranya adalah tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.), tanaman liar yang banyak ditemukan di sekitar area pertambangan nikel dan emas, serta memiliki toleransi terhadap Hg, Pb, dan As,⁸ meskipun nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) pada tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) termasuk kategori tanaman akumulator rendah.⁹ Sehingga, tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) menjadi salah satu tanaman yang memiliki sifat toleran karena dapat tumbuh di sekitar pertambangan.

Pemanfaatan *Ageratum conyzoides* L. dalam fitoremediasi dapat ditingkatkan melalui rekayasa media tanam, seperti dengan menambahkan pupuk kompos pada media *tailing* pertambangan. Bahan organik dapat memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan penyerapan logam oleh tanaman¹⁰. Kompos juga dapat membentuk senyawa organik kompleks yang justru mengikat logam lebih kuat sehingga menurunkan kelarutan dan bioavailabilitasnya. Hal ini terbukti pada penelitian yang menunjukkan penambahan kompos menghambat efektivitas bakteri *Pseudomonas aeruginosa* RTKP1 dalam meningkatkan akumulasi logam pada *Pteris vittata* L. melalui pembentukan asam organik yang mengurangi mobilitas Hg di tanah.¹¹

Selain faktor media tanam, keberadaan mikroorganisme tanah berperan penting dalam mengurangi toksisitas logam, salah satunya yaitu *Bacillus cereus*. *Bacillus cereus* merupakan bakteri tanah Gram positif yang diketahui mampu menahan dan mengakumulasi logam berat melalui transporter membran dan mekanisme detoksifikasi seluler.^{12,13} Isolat *Bacillus cereus* RTKS dari pertambangan emas Ratatotok, Minahasa Utara, Sulawesi Tenggara terbukti toleran terhadap lingkungan tercemar logam dan dapat mendukung pertumbuhan tanaman hiperakumulator melalui perbaikan fisiologis tanaman.^{9,14} Penelitian sebelumnya telah mengkaji toleransi dan kemampuan akumulasi *Ageratum conyzoides* L. terhadap merkuri (Hg), peran pupuk kompos dalam memperbaiki sifat tanah tercemar, serta potensi *Bacillus cereus* RTKS sebagai bakteri toleran logam. Namun, kajian yang mengintegrasikan ketiga komponen tersebut secara simultan dalam satu sistem fitoremediasi logam berat merkuri (Hg) masih sangat terbatas, khususnya pada tanah *tailing* emas rakyat Desa Paningkaban. Penelitian ini difokuskan pada pengujian kombinasi *Ageratum conyzoides* L., pupuk kompos, dan induksi *Bacillus cereus* RTKS pada *tailing* emas Paningkaban, yang pada penelitian sebelumnya belum melibatkan pemberian bakteri toleran logam secara terkontrol, seperti bakteri *Bacillus cereus* RTKS dan juga jumlah bunga. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) sebagai agen fitoremediasi logam berat merkuri (Hg) pada tanah *tailing* pertambangan emas Desa Paningkaban, Banyumas, dengan kombinasi pupuk kompos dan induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL). Populasi pada penelitian ini berupa semua tanah *tailing* pertambangan emas Desa Paningkaban, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah, pupuk kompos, tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.), dan bakteri *Bacillus cereus* RTKS. Sampel pada penelitian ini adalah 5,4 kg tanah *tailing* dari pertambangan emas Desa Paningkaban, Banyumas, pupuk kompos 3,2 kg, dan 6 tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.), serta 6 tabung reaksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah perlakuan berupa penambahan pupuk kompos dan induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS pada media tanah *tailing* pertambangan emas Desa Paningkaban, Banyumas yang ditanami bandotan (*Ageratum conyzoides* L.). Variabel terikat meliputi konsentrasi logam berat merkuri (Hg) pada media tanam dan jaringan tanaman *Ageratum conyzoides* L., serta respons pertumbuhan tanaman. Parameter pengamatan pertumbuhan tanaman meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah bunga selama periode perlakuan.

Lokasi penelitian ini adalah di Laboratorium Mikrobiologi dan *Greenhouse* Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta, sedangkan uji kandungan Hg pada media tanam dan tanaman *Ageratum conyzoides* L. adalah di Laboratorium Kualitas Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei-Agustus 2025.

Tahapan penelitian ini diawali sampling tanah *tailing* pertambangan emas yang diambil dari Desa Paningkaban, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, sampel tanah *tailing* yang basah diangin-keringkan, dihomogenkan, dan dihomogenkan, kemudian dianalisis kadar merkuri (Hg) sebelum dan sesudah perlakuan. Media tanam yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas dua perlakuan, yaitu tanah *tailing* dan campuran tanah *tailing* dengan kompos dengan perbandingan 1:1 (b/b). Setiap perlakuan menggunakan media tanam sebanyak 1,2 kg per *polybag* dan disusun dalam rancangan percobaan dengan tiga ulangan. Tanaman uji yang digunakan adalah bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) yang terlebih dahulu diaklimatisasi selama satu minggu di *Greenhouse* FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta. Setelah proses aklimatisasi, tanaman ditanam pada *polybag* berkapasitas 6,28 L dengan satu tanaman pada setiap *polybag*. Isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS diremajakan terlebih dahulu pada media *Natrium Agar Slant*, kemudian disuspensikan dalam larutan NaCl steril 0,85%. Suspensi bakteri selanjutnya diencerkan hingga diperoleh konsentrasi $1,55 \times 10^9$ CFU/mL. Inokulasi bakteri dilakukan dengan cara menambahkan suspensi bakteri ke media tanam di sekitar daerah perakaran tanaman pada setiap *polybag* perlakuan. Inokulasi *Bacillus cereus* RTKS dilakukan satu kali pada awal penelitian, sedangkan pada perlakuan kontrol tidak diberikan larutan steril. Pengamatan dilakukan selama sembilan minggu setelah penanaman dengan parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan jumlah bunga. Analisis kadar Hg pada tanah *tailing* dan jaringan akar serta tajuk tanaman (batang, daun, dan bunga) dengan menggunakan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) yang dilakukan pada minggu ke-9 di Laboratorium Kualitas Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Analisis data meliputi analisis deskriptif dan kuantitatif. Analisis deskriptif dilakukan terhadap peran bakteri dan kompos terhadap reduksi Hg pada media dan bioakumulasi pada *Ageratum conyzoides* L. dengan menghitung *Bioconcentration Factor* (BCF) dan *Translocation Factor* (TF). Analisis kuantitatif dengan ANOVA dengan taraf signifikansi sebesar 0,05, yang diawali dengan pengujian normalitas data menggunakan uji *Shapiro-Wilk* dan pengujian homogenitas varians dengan uji *Levene*. Analisis ANOVA ini digunakan untuk menganalisis perbedaan kemampuan bioakumulasi Hg oleh *Ageratum conyzoides* L. di antara perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas pertambangan emas yang terdapat di Desa Paningkaban, Banyumas, Jawa Tengah dapat memberikan efek negatif yang sangat besar bagi lingkungan sekitarnya, terutama bagi tanah yang tercemar karena dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan. Kegiatan ini dapat merusak vegetasi dan mengganggu karakteristik genetik tanah, sehingga lahan yang semula subur berangsur berubah menjadi kering dan tidak produktif.¹⁵ Meski demikian, beberapa jenis tanaman masih mampu bertahan di kawasan terdampak, salah satunya adalah bandotan (*Ageratum conyzoides* L.). Penelitian menunjukkan bahwa tanaman ini ditemukan tumbuh cukup melimpah di area bekas tambang emas rakyat di Kecamatan Naga Juang, Kabupaten Mandailing Natal, dengan jumlah mencapai 322 individu.¹⁶ Data mengenai penurunan konsentrasi logam berat merkuri (Hg) yang diperoleh dari pengukuran selanjutnya dianalisis untuk melihat nilai BCF, TF, serta respons pertumbuhan tanaman pada penelitian ini. Hasil pengukuran BCF, TF, serta perubahan kadar Hg pada tanah *tailing* sebelum dan sesudah perlakuan selama 9 minggu (± 2 bulan) dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Reduksi Merkuri (Hg) pada Tanah *Tailing*

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kandungan Merkuri (Hg) Sebelum dan Sesudah Perlakuan

Perlakuan	Media Tanam (mg/kg)			Jaringan Tanaman (mg/kg)	
	Hg Sebelum Perlakuan	Hg Sesudah Perlakuan	Reduksi Hg Tanah (%)	Hg Akar	Hg Tajuk
BCR	10.7 mg/kg	0.007 mg/kg	99.93%	0.001 mg/kg	0.0001 mg/kg
BCC	10.7 mg/kg	0.018 mg/kg	99.83%	0.001 mg/kg	0.0001 mg/kg
Kp	10.7 mg/kg	0.018 mg/kg	99.83%	0.003 mg/kg	0.0001 mg/kg

Sumber data diolah dari hasil uji Laboratorium Kualitas Lingkungan FTSP UII

Keterangan:

BCR: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

BCC: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + pupuk kompos + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

Kp: Kontrol, media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.)

Hasil uji reduksi cemaran merkuri (Hg) pada Tabel 1 menunjukkan bahwa seluruh perlakuan yang diberikan mampu menurunkan kandungan Hg secara signifikan. Perlakuan pertama menunjukkan tingkat reduksi Hg tertinggi, yaitu sebesar 99,93%, yang menandakan kemampuan remediasi yang sangat efektif terhadap cemaran merkuri. Sementara itu, perlakuan kedua dan ketiga masing-masing menghasilkan persentase reduksi Hg sebesar 99,83%, yang juga menunjukkan penurunan kadar Hg yang sangat tinggi dan relatif seragam antarperlakuan. Meskipun terdapat perbedaan nilai persentase reduksi, selisih yang dihasilkan antarperlakuan tergolong kecil, sehingga secara umum ketiga perlakuan menunjukkan efektivitas yang hampir setara dalam menurunkan kandungan merkuri pada media tanam. Perlakuan dengan penambahan pupuk kompos menunjukkan kandungan Hg yang lebih tinggi pada akar dan tajuk tanaman dibandingkan dengan perlakuan tanpa kompos. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa penambahan bahan organik seperti kompos pada tanah tercemar mampu mengoptimalkan penyerapan merkuri oleh jaringan tanaman. Hal tersebut diduga berkaitan dengan perbaikan struktur tanah akibat kombinasi tanah dan bahan organik, sehingga ketersediaan unsur hara meningkat dan penyerapan logam berat oleh tanaman menjadi lebih efektif. Logam berat yang terserap selanjutnya terdistribusi ke jaringan tanaman, menyebabkan penurunan kadar Hg di tanah dan peningkatan akumulasi Hg pada akar dan daun.¹⁰ Penelitian lain juga melaporkan bahwa *Ageratum conyzoides* L. mampu menyerap merkuri lebih tinggi pada media tanam dengan penambahan kompos, yang ditunjukkan oleh peningkatan kadar Hg pada akar dan tajuk. Penambahan kompos meningkatkan pasokan bahan organik yang berperan sebagai pengikat merkuri di dalam tanah.¹⁷

Berdasarkan hasil penelitian, seluruh perlakuan menunjukkan kadar Hg yang lebih tinggi pada akar dibandingkan tajuk. Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya proses fitostabilisasi, yaitu logam berat terakumulasi dan terimobilisasi pada akar.¹⁸ Merkuri masuk ke akar bersamaan dengan penyerapan air. Air bergerak bebas secara apoplastik (melalui celah dinding sel) hingga mencapai pita Kaspary di endodermis akar. Pita Kaspary bertindak sebagai penghalang hidrofobik yang mencegah merkuri masuk secara bebas ke pembuluh xilem. Untuk melewati titik ini, merkuri harus masuk ke jalur simplastik (melalui membran sel). Karena merkuri adalah logam berat non-esensial yang sangat toksik, sel akar mengaktifkan mekanisme proteksi dengan mengikat ion merkuri pada senyawa tiol (seperti fitokelatin dan metalotionein) dan menyimpannya di dalam vakuola sel

akar. Akibatnya, sebagian besar merkuri terikat di akar sebelum sempat ikut mengalir bersama air ke xilem.¹⁸ Akumulasi logam pada akar merupakan mekanisme detoksifikasi tanaman untuk mengurangi dampak toksik logam terhadap sel tanaman.¹⁹

Pada perlakuan induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS tanpa penambahan kompos, kandungan Hg pada *tailing* lebih rendah dibandingkan perlakuan penambahan kompos dengan reduksi Hg tanah tertinggi dengan persentase sebesar 99.93%. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa simbiosis antara bakteri resisten merkuri dan tanaman akumulator dapat meningkatkan akumulasi Hg secara signifikan. Penurunan kadar Hg tanah hingga 20% juga dilaporkan pada tanaman *P. conjugatum* dengan induksi bakteri resisten merkuri.²⁰ Selain itu, penelitian lain menyebutkan bahwa *Bacillus* spp. memiliki toleransi logam yang tinggi dan berpotensi meremediasi logam berat hingga 98%.²¹ *Bacillus cereus* juga mampu mereduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 melalui ekspresi gen *merA*, sehingga menurunkan toksisitas merkuri.²² Sebaliknya, perlakuan induksi *Bacillus cereus* RTKS dengan penambahan kompos menunjukkan konsentrasi Hg *tailing* yang lebih tinggi. Hasil ini dapat dijelaskan oleh penelitian yang melaporkan bahwa pada proses pengomposan dapat terjadi kompetisi antara mikroorganisme indigenus dan bakteri terinduksi, sehingga menurunkan efektivitas bioremediasi.²³ Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa penambahan kompos pada *tailing* menghambat kinerja bakteri resisten merkuri.¹¹

Akumulasi dan Translokasi Tanaman

Tabel 2. Perhitungan *Bioconcentration Factor* dan *Translocation Factor*

Perlakuan	BCF Akar	BCF Tajuk	TF
BCR	0.143 ± 0.007	0.0143 ± 0.0007	0.1 ± 0.006
BCC	0.2 ± 0.007	0.005 ± 0.0003	0.025 ± 0.002
Kp	0.16 ± 0.007	0.005 ± 0.0003	0.03 ± 0.001

Keterangan:

BCR: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

BCC: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + pupuk kompos + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

Kp: Kontrol, media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.)

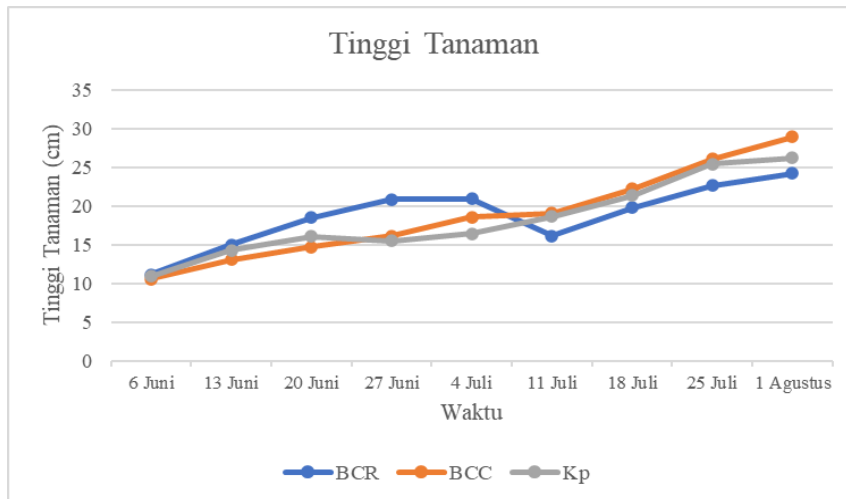
Kemampuan akumulasi Hg oleh *Ageratum conyzoides* L. ditunjukkan oleh nilai *Bioconcentration Factor* (BCF). Berdasarkan Tabel 2, nilai BCF pada akar lebih tinggi dibandingkan tajuk, yang menunjukkan dominasi akumulasi Hg pada akar. Logam berat diserap melalui akar dan sebagian ditranslokasikan ke jaringan atas melalui xilem dan floem. Namun, sebagian merkuri tetap terakumulasi pada akar sebagai bentuk imobilisasi.²⁴ Fenomena ini menunjukkan mekanisme lokalisasi logam sebagai salah satu bentuk detoksifikasi tanaman untuk mengurangi efek toksik merkuri terhadap sel. Merkuri yang berada dalam bentuk terlarut dapat memasuki jaringan akar melalui jalur simplas maupun apoplas. Akan tetapi, perpindahannya menuju silinder pusat dibatasi oleh pita Kaspary (*Casparian strip*) pada endodermis sehingga ion logam harus melewati membran sel secara selektif sebelum dapat memasuki pembuluh xilem. Setelah berada di dalam xilem, merkuri ditranslokasikan mengikuti aliran getah yang digerakkan oleh proses transpirasi menuju organ bagian atas tanaman. Logam tersebut kemudian dikompartementalisasi ke dalam dinding sel, sitosol, atau vakuola sebagai mekanisme untuk menurunkan toksisitasnya terhadap jaringan tanaman.¹⁸ Nilai BCF yang diperoleh pada sebagian besar perlakuan berada pada kisaran 0.01–0.1, sehingga *Ageratum conyzoides* L. dikategorikan sebagai tanaman akumulator rendah.²⁵ Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan nilai BCF tanaman *Ageratum conyzoides* L. pada lokasi pertambangan emas Ratatotok berada pada kategori akumulator rendah.⁹

Nilai *Translocation Factor* (TF) pada seluruh perlakuan berkisar antara 0.025–0.1. Nilai $TF < 1$ menunjukkan bahwa logam berat lebih banyak terakumulasi pada akar, sehingga tanaman berperan dalam fitostabilisasi.²⁶ Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa *Ageratum conyzoides* L. berfungsi sebagai agen fitostabilisasi.¹⁷ Fitostabilisasi terjadi melalui penahanan logam pada dinding sel dan vakuola akar, pembentukan kompleks stabil dengan fitokelatin dan asam organik, serta perubahan kondisi rizosfer yang menurunkan mobilitas logam.²⁷

Pada perlakuan *tailing* dengan penambahan kompos dan induksi bakteri, nilai BCF dan TF merupakan yang terendah. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang melaporkan bahwa penambahan kompos dapat menurunkan efektivitas induksi bakteri akibat pengikatan logam oleh asam organik.¹¹ Penelitian lain melaporkan bahwa kompos mampu menurunkan nilai BCF dan TF logam berat Cd dan Pb²⁸, sementara studi lainnya menegaskan bahwa kompetisi mikroorganisme selama proses pengomposan dapat menurunkan kinerja bioremediasi.²³

Respons Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Tinggi Tanaman

Parameter yang diukur untuk mengetahui bahwa tanaman *Ageratum conyzoides* L. menjadi salah satu tanaman yang berpotensi menjadi tanaman hiperakumulator adalah performa tanaman saat diujikan dengan kedua perlakuan. Pengukuran tinggi tanaman dilakukan setiap satu minggu sekali selama 9 minggu (2 bulan) perlakuan. Data tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Tinggi Tanaman

Keterangan:

BCR: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

BCC: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + pupuk kompos + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

Kp: Kontrol, media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.)

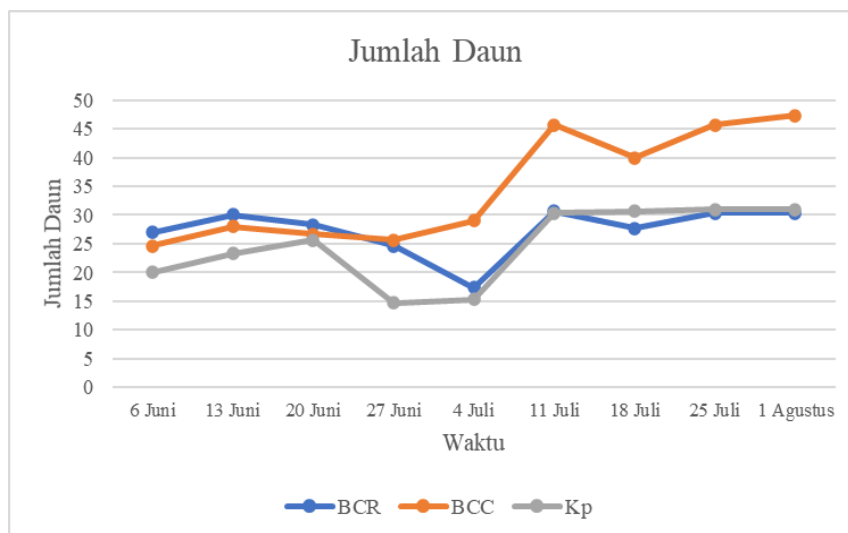
Pengukuran tinggi tanaman *Ageratum conyzoides* L. dilakukan setiap minggu selama penelitian untuk mengevaluasi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Berdasarkan Gambar 1, perlakuan penambahan kompos yang dikombinasikan dengan induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS menunjukkan rata-rata tinggi tanaman tertinggi pada akhir perlakuan. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa penggunaan tanah *tailing* dengan penambahan kompos menghasilkan pertumbuhan tinggi tanaman terbaik setelah satu bulan perlakuan.¹¹ Penambahan kompos diketahui mampu memperbaiki karakteristik tanah *tailing*, meningkatkan kesuburan media tanam, serta mengoptimalkan aktivitas rhizobacteria, sehingga mendukung ketahanan dan pertumbuhan tanaman.²⁹ Selain kompos, peran *Bacillus cereus* sebagai bakteri pemacu pertumbuhan tanaman atau *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) juga berkontribusi terhadap peningkatan tinggi tanaman. Hal ini sejalan dengan penelitian menyatakan bahwa PGPR seperti *Bacillus cereus* dapat menggantikan peran pupuk kimia, pestisida, dan hormon pertumbuhan melalui peningkatan tinggi tanaman, panjang akar, dan biomassa.³⁰ Studi lain menegaskan bahwa bakteri ini meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme langsung, seperti produksi IAA, giberelin, sitokinin, enzim ACC deaminase, fiksasi nitrogen, dan pelarutan fosfor,³¹ serta mekanisme tidak langsung melalui produksi antibiotik, enzim hidrolitik, dan siderofor.³² Meskipun demikian, hasil uji ANOVA pada taraf signifikansi 0,05 menunjukkan bahwa data tinggi tanaman memenuhi asumsi normalitas (uji *Shapiro-Wilk*, $p > 0,05$) dan homogenitas varians (uji *Levene*, $p > 0,05$). Analisis ANOVA menunjukkan $p > 0,05$ yang artinya bahwa perlakuan tidak berpengaruh signifikan terhadap tinggi tanaman ($F = 0,028$; $p = 0,973$). Hal ini mengindikasikan bahwa *Ageratum conyzoides* L. masih mampu beradaptasi serta memiliki mekanisme toleransi terhadap cekaman logam berat merkuri. Mekanisme tersebut memungkinkan tanaman ini menyerap merkuri dari tanah *tailing* pertambangan secara relatif optimal, sehingga berpotensi menurunkan tingkat toksisitas lingkungan, memperbaiki kualitas tanah tercemar, dan mendukung proses pemulihan ekosistem secara alami.⁹ Namun, tinggi tanaman bukan merupakan parameter yang secara langsung mencerminkan kemampuan akumulasi maupun translokasi logam berat. Efisiensi fitoremediasi lebih tepat dievaluasi berdasarkan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) dan *Translocation Factor* (TF). Pada penelitian ini, nilai TF seluruh perlakuan < 1 dan BCF akar lebih tinggi dibandingkan BCF tajuk, menunjukkan bahwa Hg cenderung terakumulasi di akar dengan translokasi yang terbatas ke bagian atas tanaman.²⁴ Oleh karena itu, tidak adanya perbedaan tinggi tanaman tidak berkaitan dengan kekuatan translokasi Hg, melainkan menunjukkan bahwa mekanisme penyerapan dan retensi Hg pada *Ageratum conyzoides* lebih ditentukan oleh proses fisiologis di jaringan akar daripada oleh pertumbuhan batang.¹⁸ Temuan hasil uji ANOVA ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi merkuri

tidak memberikan pengaruh nyata terhadap tinggi tanaman seruni rambat, yang diduga memiliki kemampuan adaptasi dan toleransi terhadap merkuri.³³ Tanaman pada kondisi tercemar logam berat akan mengaktifkan mekanisme pembatasan translokasi logam ke xilem sebagai bentuk perlindungan terhadap toksisitas logam.³⁴ Kemampuan toleransi *Ageratum conyzoides* L. juga digambarkan dari nilai BCF dan TF (Tabel 2) yang menunjukkan mekanisme fitostabilisasi. Pada mekanisme ini, logam berat cenderung terakumulasi di akar melalui proses reduksi ion logam oleh enzim reduktase pada membran sel akar.³⁵ Tanaman juga dapat mensintesis fitokhelatin sebagai senyawa pengikat logam yang bersifat induktif, sehingga membantu menekan dampak toksik logam berat terhadap jaringan tanaman.³⁶

Pada perlakuan induksi *Bacillus cereus* RTKS tanpa penambahan kompos menunjukkan rata-rata tinggi tanaman terendah pada akhir perlakuan. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa perlakuan *tailing* dengan penambahan isolat bakteri menghasilkan pertumbuhan tinggi tanaman terendah.¹¹ Studi lain menjelaskan bahwa introduksi bakteri eksogen berpotensi menimbulkan kompetisi dengan mikroba lokal, yang dalam kondisi tertentu dapat memberikan efek negatif terhadap pertumbuhan tanaman.³⁷

Jumlah Daun

Parameter yang diukur untuk mengetahui bahwa tanaman *Ageratum conyzoides* L. menjadi salah satu tanaman yang berpotensi menjadi tanaman hiperakumulator adalah jumlah daun. Perhitungan jumlah daun dilakukan selama satu minggu sekali selama 9 minggu (2 bulan) perlakuan. Data penambahan jumlah daun dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Jumlah Daun

Keterangan:

BCR: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

BCC: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + pupuk kompos + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

Kp: Kontrol, media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.)

Berdasarkan Gambar 2, jumlah daun *Ageratum conyzoides* L. pada seluruh perlakuan dan kontrol mengalami penurunan pada minggu ke-4. Penurunan ini berkaitan dengan penyerapan logam berat yang berlangsung bersamaan dengan penyerapan unsur hara, sehingga logam berat dapat terdistribusi ke berbagai jaringan tanaman. Tanaman memiliki batas toleransi terhadap akumulasi logam berat, dan akumulasi Hg yang tinggi dapat menyebabkan saturasi jaringan, menghambat difusi oksigen ke akar, serta memicu kematian tanaman, yang berdampak pada berkurangnya jumlah daun.³⁸ Namun, pada perlakuan induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS dengan penambahan pupuk kompos terlihat peningkatan jumlah daun tertinggi mulai minggu ke-5 hingga akhir perlakuan. Hal ini berkaitan dengan peran unsur hara esensial, khususnya nitrogen dan fosfor, yang berperan dalam pembentukan sel baru dan senyawa organik penyusun tanaman sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif, terutama jumlah daun.³⁹ Penambahan kompos juga diketahui mampu memperbaiki karakteristik tanah *tailing*, meningkatkan kesuburan media tanam, serta mengoptimalkan aktivitas rhizobacteria melalui mekanisme langsung dan mekanisme tidak langsung, sehingga meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan.^{29,31,32}

Peningkatan jumlah daun juga dipengaruhi oleh kemampuan adaptasi *Ageratum conyzoides* yang tinggi terhadap lingkungan tercemar logam berat, sehingga tanaman tetap mampu tumbuh relatif baik meskipun tanpa penambahan bakteri maupun kompos. Hal ini didukung oleh penelitian yang melaporkan bahwa *Ageratum*

conyzoides merupakan spesies dominan di lahan pascatambang dengan nilai INP sebesar 42,868%.⁴⁰ Meskipun peningkatan jumlah daun berpotensi meningkatkan laju transpirasi dan aliran air melalui xilem, kondisi tersebut tidak secara langsung diikuti oleh peningkatan translokasi merkuri (Hg) ke bagian tajuk. Merkuri memiliki mobilitas yang rendah dalam jaringan vaskular tanaman dan cenderung terikat serta terakumulasi pada jaringan akar.²⁴ Sebagai tumbuhan pionir, *Ageratum conyzoides* memiliki toleransi tinggi terhadap lahan terdegradasi dan miskin unsur hara, serta berperan dalam proses pemulihan kualitas tanah.⁴¹ Kemampuan ini didukung oleh asosiasi antara tanaman *Ageratum conyzoides* dengan mikroorganisme di zona perakaran yang berkontribusi dalam memperbaiki kondisi lahan pascatambang.⁴² Faktor ini diperkuat dengan analisis non-parametrik *Kruskal–Wallis* yang menunjukkan bahwa perlakuan tidak berpengaruh signifikan terhadap jumlah daun ($df = 2$; $p = 0,297$). Penggunaan uji non-parametrik ini didasarkan pada hasil uji asumsi yang menunjukkan bahwa data jumlah daun tidak memenuhi asumsi normalitas (uji *Shapiro–Wilk*, $p < 0,05$) dan homogenitas varians (uji *Levene*, $p < 0,05$) pada taraf signifikansi 0,05.

Peningkatan jumlah daun juga berkorelasi dengan tinggi tanaman, di mana perlakuan induksi *Bacillus cereus* RTKS dengan penambahan pupuk kompos menghasilkan nilai tinggi tanaman (Gambar 1) dan jumlah daun (Gambar 2) tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa tanaman yang lebih tinggi memiliki jumlah ruas batang lebih banyak, sehingga berpotensi menghasilkan daun dalam jumlah lebih besar.⁴³

Respons Pertumbuhan Generatif Tanaman

Jumlah Bunga

Parameter yang diukur untuk mengetahui bahwa tanaman *Ageratum conyzoides* L. menjadi salah satu tanaman yang berpotensi menjadi tanaman hiperakumulator adalah jumlah bunga. Paparan logam berat, seperti merkuri (Hg), di dalam tanah memicu stres fisiologis pada tanaman hiperakumulator seperti *Ageratum conyzoides* L. Stres ini mengalokasikan ulang energi tanaman dari fungsi reproduksi ke mekanisme pertahanan seluler, yang secara visual ditunjukkan oleh penurunan komponen generatif seperti jumlah bongkol bunga majemuk dan kuntum bunga per bongkol. Perhitungan bunga dilakukan selama satu minggu sekali selama 9 minggu (2 bulan) perlakuan. Data penambahan jumlah bunga dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 3.

Tabel 3. Jumlah Bunga pada Perlakuan BCR, BCC, dan Kp

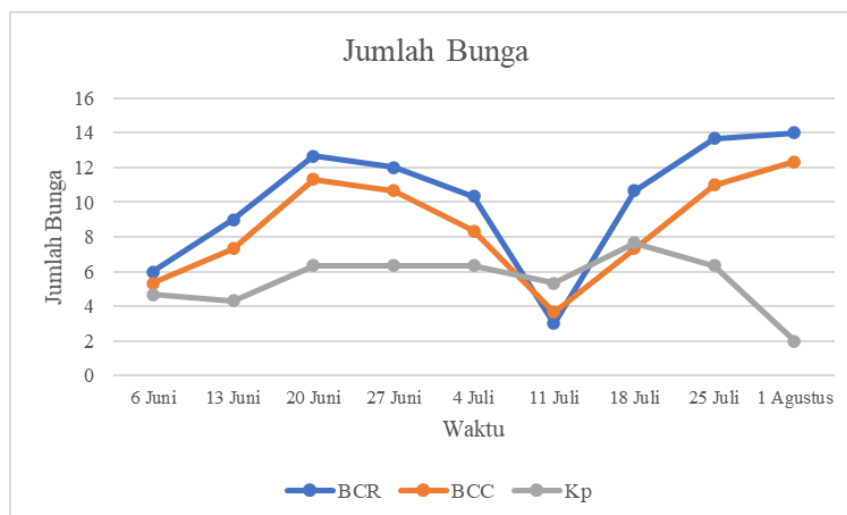
Perlakuan	Waktu								
	6 Juni	13 Juni	20 Juni	27 Juni	4 Juli	11 Juli	18 Juli	25 Juli	1 Agustus
BCR	6	9	13	12	10	3	11	14	14
BCC	5	7	11	11	8	4	7	11	12
Kp	5	4	6	6	6	5	8	6	2

Keterangan:

BCR: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

BCC: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + pupuk kompos + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

Kp: Kontrol, media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.)



Gambar 3. Grafik Jumlah Bunga

Keterangan:

BCR: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

BCC: Perlakuan media tanam dengan *tailing* tambang + pupuk kompos + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) + induksi isolat bakteri *Bacillus cereus* RTKS

Kp: Kontrol, media tanam dengan *tailing* tambang + tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.)

Berdasarkan hasil penelitian, seluruh perlakuan maupun kontrol menunjukkan penurunan jumlah bunga pada minggu ke-5. Selain itu pengamatan terhadap jumlah bunga atau generatif *Ageratum conyzoides* L. menunjukkan adanya variasi pada jumlah bongkol bunga per tanaman selama proses fitoremediasi berlangsung. Secara keseluruhan, kuantitas bunga per batang terdapat pada rentang nilai minimum sebesar 2 bunga hingga nilai maksimum mencapai 14 bunga. Fluktuasi nilai ini juga mengindikasikan bahwa tingkat paparan kontaminan di dalam tanah memberikan pengaruh yang dinamis terhadap kapasitas reproduksi tanaman *Ageratum conyzoides* L. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa paparan merkuri pada *Cucumis sativus* L. dan *Momordica charantia* L. menyebabkan penundaan pembungaan yang signifikan, sehingga menurunkan jumlah bunga jantan dan betina.⁴⁴ Hasil uji ANOVA pada taraf signifikansi 0,05 menunjukkan bahwa data jumlah bunga memenuhi asumsi normalitas (uji *Shapiro-Wilk*, $p > 0,05$) dan homogenitas varians (uji *Levene*, $p > 0,05$). Analisis ANOVA menunjukkan $p < 0,05$ yang artinya bahwa perlakuan berpengaruh secara signifikan terhadap jumlah bunga ($F = 6.150$; $p = 0,007$). Stres akibat cemaran logam berat seperti merkuri (Hg) dapat menghambat fase pembungaan tanaman.⁴⁵ Hal ini didukung oleh penelitian yang melaporkan bahwa merkuri mengganggu proses inisiasi pembungaan pada tahap awal pembentukan bunga.⁴⁶ Selain menyebabkan keterlambatan pembungaan, paparan merkuri juga dapat memicu kematian bunga, sehingga terjadi kerontokan dan penurunan jumlah bunga total. Merkuri bersifat toksik bagi tanaman dan peningkatan konsentrasinya akan memperparah tingkat keracunan sehingga menyebabkan kematian jaringan tanaman.⁴⁷ Selain itu, hasil ANOVA ini menunjukkan bahwa *Ageratum conyzoides* L. masih mampu mempertahankan pertumbuhan pada kondisi tercemar merkuri, yang mengindikasikan perannya dalam mereduksi dampak toksisitas merkuri serta mendukung stabilitas ekosistem tanah tercemar.^{9,42}

Berdasarkan grafik hasil penelitian, jumlah bunga tertinggi diperoleh pada perlakuan media *tailing* dengan penambahan bakteri *Bacillus cereus* RTKS tanpa kompos. *Bacillus* sp. berpotensi meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi hormon indol asam asetat (IAA) dan kemampuan melarutkan fosfat.⁴⁸ Hal ini sejalan dengan studi yang melaporkan bahwa IAA berperan dalam mengurangi efek stres logam berat serta menginduksi pertumbuhan dan inisiasi pembungaan.⁴⁴ Sebaliknya, penambahan kompos pada media *tailing* yang diinduksi *Bacillus cereus* RTKS justru menghasilkan jumlah bunga yang lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa penambahan kompos dapat menurunkan efektivitas bakteri PGPR akibat kompetisi dengan mikroorganisme asli media tanam.¹¹ Kompetisi di daerah rizosfer dapat menghambat kolonisasi dan aktivitas bakteri yang diintroduksi, sehingga mengurangi perannya dalam mendukung pertumbuhan tanaman.⁴⁹

Perbedaan hasil ANOVA pada respons antara parameter vegetatif dan generatif, di mana tinggi tanaman dan jumlah daun tidak menunjukkan perbedaan signifikan sementara jumlah bunga berbeda nyata, diduga berkaitan dengan kecenderungan merkuri yang lebih kuat memengaruhi proses reproduktif tanaman. Hal ini diperkuat oleh penelitian yang menunjukkan bahwa kontaminasi logam berat memberikan dampak lebih besar terhadap proses reproduksi, termasuk pembentukan bunga dan fertilitas, dibandingkan karakter vegetatif. Studi pada populasi *Viola tricolor* di area tercemar logam berat menunjukkan bahwa karakter vegetatif relatif stabil, sedangkan proses reproduktif mengalami gangguan yang signifikan.⁵⁰

SIMPULAN

Penelitian ini dapat disimpulkan bahwa tanaman bandotan (*Ageratum conyzoides* L.) terbukti memiliki kemampuan sebagai fitoremediator pada tanah *tailing* pertambangan emas Desa Paningkaban, Banyumas. Kemampuan ini terlihat dari penurunan kadar merkuri (Hg) pada tanah setelah perlakuan, serta adanya akumulasi Hg pada jaringan tanaman, terutama pada bagian akar. Nilai BCF yang berada pada kisaran 0.01–0.1 dan nilai TF <1 menunjukkan bahwa bandotan berperan sebagai tanaman akumulator rendah dengan mekanisme utama fitostabilisasi. Kombinasi induksi bakteri *Bacillus cereus* RTKS dan penambahan pupuk kompos tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan tanaman *Ageratum conyzoides* L. dalam meremediasi logam berat merkuri (Hg) pada tanah *tailing* pertambangan emas dikarenakan adanya kompetisi mikroba. Hasil ini diperkuat dengan hasil uji ANOVA pada parameter tinggi tanaman dan jumlah daun menunjukkan nilai $p > 0,05$, sementara nilai BCF dan TF juga relatif tidak berbeda antar perlakuan. Meskipun demikian, kompos tetap berkontribusi dalam memperbaiki kondisi tanah melalui kandungan bahan organiknya, dan *Bacillus cereus* RTKS tetap berperan dalam membantu penurunan Hg di tanah melalui mekanisme toleransi logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Briyantara SS, Yulianto T. Aplikasi Metode Magnetik untuk Melokalisasi Target Zona Mineralisasi Emas di Daerah "X". *Youngster Physics Journal*. 2015 Jan 1;4(1):1-6.

2. Nurcahyo MA, Utomo NB. Tinjauan Atas Pengawasan Kerja pada Prosedur Kepabaenan Impor Emas. *Info Artha*. 2022;6(2):126-38. <https://doi.org/10.31092/jia.v6i2.1768>
3. Raharjo SA, Wibowo O. Pendugaan Model Sumber Anomali Magnetik Bawah Permukaan di Area Pertambangan Emas Rakyat Desa Paningkaban, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas. *Jurnal Fisika Indonesia*. 2014;(53).
4. Muslihudin M, Bambang AN, Hendarto E, Putranto TT. Model Pengelolaan Pertambangan Emas Tradisional di Kecamatan Gumelar Kabupaten Banyumas Provinsi Jawa Tengah. (Doctoral dissertation, School of Postgraduate Universitas Diponegoro). 2019.
5. Baker L, Denyes MJ. Prediktor Perawatan Diri Pada Remaja Dengan Cystic Fibrosis: Tes Teori Orem Tentang perawatan Diri Dan Defisit Perawatan Diri. *Jurnal Keperawatan Anak*. 2004;23:37-48.
6. Ghassani KN, Titah HS. Kajian Fitoremediasi untuk Rehabilitasi Lahan Pertanian Akibat Tercemar Limbah Industri Pertambangan Emas. *JTITS*. 2022 Apr 18;11(1):F8-14. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i1.82682>
7. Kurniawan B, Duryat D, Riniarti M, Yuwono SB. Kemampuan Adaptasi Tanaman Mahoni (*Swietenia macrophylla*) terhadap Cemar Merkuri pada Tailing Penambangan Emas Skala Kecil Adaptation Ability of Mahogany (*Swietenia macrophylla*) against Mercury Contamination from Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Jurnal Sylva Lestari*. 2019;7(3):359-69. <https://doi.org/10.23960/jsl37359-369>
8. Hamzah A, Priyadarshini R. Identification of Wild Grass as Remediator Plant on Artisanal Gold Mine Tailing. *PSI*. 2014 Dec 28;1(1):33-40. <https://doi.org/10.12735/psi.v1n1p33>
9. Aminatun T, Idrus A, Simbolon D, Rakhmawati A, Atun S. Lithogeochemical characteristics and potential hyperaccumulator identification as phytomining agent at the Ratatotok gold mine, Indonesia. *J Degrad Min Land Manage*. 2024;11(2):5251-61. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.112.5251>
10. Putri K. Remediasi tanah tercemar merkuri (Hg) menggunakan tanaman *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler dan *Fimbristylis aphylla* (Lamk.) Vahl [master's thesis]. Padang: Universitas Andalas; 2014.
11. Aminatun T, Rakhmawati A, Atun S, Idrus A, Sujangka A. Role of plant growth promoting rhizobacteria on *Pteris vittata* L as a potential hyperaccumulator plant for gold phytomining agent. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 2025;12(2):7217-24. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.122.7217>
12. Sharma B, Shukla P. Lead bioaccumulation mediated by *Bacillus cereus* BPS-9 from an industrial waste contaminated site encoding heavy metal resistant genes and their transporters. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;401:123285. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123285>
13. Huang Y, Yang L, Pan K, Yang Z, Yang H, Liu J, et al. Heavy metal-tolerant bacteria *Bacillus cereus* BCS1 degrades pyrethroid in a soil-plant system. *Journal of Hazardous Materials*. 2024;461:132594. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132594>
14. Wróbel M, Śliwakowski W, Kowalczyk P, Kramkowski K, Dobrzyński J. Bioremediation of Heavy Metals by the Genus *Bacillus*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023 Mar 11;20(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph20064964>
15. Pattimahu DV, Siahaya AN, Pattimahu TV. Dampak penambangan emas terhadap lingkungan di desa tamilouw kecamatan amahai, kabupaten maluku tengah. *Jurnal Hutan Pulau-Pulau Kecil*. 2021;5(1):90-6. <https://doi.org/10.30598/jhppk.2021.5.1.90>
16. Sipayung J. Analisis vegetasi tumbuhan bawah pada areal lahan bekas tambang emas rakyat di Kecamatan Naga Juang Kabupaten Mandailing Natal [thesis]. Medan: Universitas Sumatera Utara; 2016. <https://repository.usu.ac.id/handle/123456789/54975>
17. Althaaf NT, Aminatun T, Rakhmawati A, Atun S. Reduction of the Heavy Metal Mercury (Hg) from Paningkaban Gold Mining Tailings, Bayumas, with *Ageratum Conyzoides*. *Jurnal Sains Dasar*. 2025;14(1):31-9. <https://doi.org/10.21831/jsd.v14i1.73206>
18. Pandia S, Purba E, Hasan W. Kajian Akumulator Beberapa Tumbuhan Air Dalam Menyerap Logam Berat Secara Fitoremediasi. *Jurnal Serambi Engineering*. 2017;1(2):75-84. <https://doi.org/10.32672/jse.v1i2.498>

19. Hardiani H. Potensi Tanaman dalam Mengakumulasi Logam Cu pada Media Tanah Terkontaminasi Limbah Padat Industri Kertas. *Jurnal Selulosa*. 2009;44(1).
20. Ustiatik R, Nurfitriani S, Fiqri A, Handayanto E. The Use of Mercury-Resistant Bacteria to Enhance Phytoremediation of Soil Contaminated with Small-scale Gold Mine Tailing. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2020;19(1).
21. Saha L, Tiwari J, Baudh K, Ma Y. Recent developments in microbe-plant-based bioremediation for tackling heavy metal-polluted soils. *Front Microbiol*. 2021;12:731723. <https://doi:10.3389/fmicb.2021.7317>
22. Yulianto A. A review: pemanfaatan bakteri untuk bioremediasi logam berat Pb, Cd, dan Hg di lingkungan perairan. *Maiyah*. 2025;4(2). <https://doi.org/10.20884/1.maiyah.2025.4.2.16400>
23. Abtahi H, Parhamfar M, Saeedi R, Villaseñor J, Sartaj M, Kumar V, et al. Effect of competition between petroleum-degrading bacteria and indigenous compost microorganisms on the efficiency of petroleum sludge bioremediation: field application of mineral-based culture in the composting process. *J Environ Manage*. 2020;258:110013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110013>
24. Ali I, Rondonuwu SB, Dapas FNJJM. Analisis kandungan merkuri pada tanah dan umbi tanaman ubi kayu (*Manihot esculenta* Crantz) di daerah pertambangan Desa Soyowan, Minahasa Tenggara. *J MIPA*. 2019;8(3):143-9.
25. Kurniawan R, Hamim H, Henny C, Satya A. Identification of potential phytoaccumulator plants from tailings area as a gold phytomining agent. *J Ecol Eng*. 2022;23(4):168-78. <https://doi:10.12911/22998993/143978>.
26. Mocek-Płóćiniak A, Mencil J, Zakrzewski W, Roszkowski S. Phytoremediation as an Effective Remedy for Removing Trace Elements from Ecosystems | MDPI . 2025. <https://doi.org/10.3390/plants12081653>
27. Shackira AM, Puthur JT. Phytostabilization of Heavy Metals: Understanding of Principles and Practices. Srivastava S, Srivastava AK, Suprasanna P, editors. 2019;263-82. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20732-8_13
28. Li J, Chang Y, Al-Huqail AA, Ding Z, Al-Harbi MS, Ali EF, et al. Effect of manure and compost on the phytostabilization potential of heavy metals by the halophytic plant wavy-leaved salt bush. *Plants(Basel)*. 2021;10(10):2176. <https://doi.org/10.3390/plants10102176>
29. Benidire L, Madline A, Pereira SIA, Castro PML, Boularbah A. Synergistic effect of organo-mineral amendments and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on the establishment of vegetation cover and amelioration of mine tailings. *Chemosphere*. 2021;262:127803. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127803>
30. Saharan BS, Nehra V. Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sci Med Res*. 2011;21(1):30.
31. Ahemad M. Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: Paradigms and prospects. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019;12(7):1365-77. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.020>
32. Dobrzyński J, Wróbel B, Górka EB, Dobrzyński J, Wróbel B, Górka EB. Cellulolytic Properties of a Potentially Lignocellulose-Degrading *Bacillus* sp. 8E1A Strain Isolated from Bulk Soil. *Agronomy*. 2022;12(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy12030665>
33. Lona LM, Linda R, Mukarlina. Pengaruh Logam Merkuri (Hg) Terhadap Pertumbuhan Seruni Rambat (*Wedelia trilobata* L. Hitchc). *Protobiont*. 2015;4(3). <https://doi:10.26418/protobiont.v4i3.13291>
34. Reichman SM. The Responses of Plants to Metal Toxicity: A review focusing on Copper, Manganese and Zinc. 2025.
35. Ghosh M, Singh SP. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Appl Ecol Environ Res*. 2005;3(1):1-18. https://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018
36. Chaney RL. Improving Metal Hyperaccumulator Wild Plants to Develop Commercial Phytoextraction Systems: Approaches and Progress. In: ResearchGate .2025. <https://doi.org/10.1201/9780367803148-7>
37. Phyto AK, Jia Y, Tan Q, Sun H, Liu Y, Dong B, et al. Competitive Growth of Sulfate-Reducing Bacteria with Bioleaching Acidophiles for Bioremediation of Heap Bioleaching Residue. *International*

- Journal of Environmental Research and Public Health.2020;17(8).
<https://doi.org/10.3390/ijerph17082715>
38. Suhadiyah S, Umar MR. Berat Besi (Fe) Pada Kiapu Pistia str Air Sumur Sekitar Workshop Unhas. 2016.
 39. Hakim. Kesuburan Tanah [Internet]. Universitas Lampung; 1988 .
 40. Istiqomah M. Identifikasi Tumbuhan Potensial untuk Restorasi Areal Pascatambang Batu Kapur di Kelurahan Kota Baru, Kecamatan Tanjung Karang Timur, Kota Bandar Lampung. (Doctoral dissertation. Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung). 2023.
 41. Isnaniarti UN, Ekyastuti W, Ekamawanti HA. Suksesi Vegetasi Pada Lahan Bekas Penambangan Emas Rakyat di Kecamatan Monterado Kabupaten Bengkayang. JT. 2018;7(1).
<https://doi.org/10.26418/jt.v7i1.22772>
 42. Syachroni SH, Rosianty Y, Samsuri GS. Daya tumbuh tanaman pionir pada area bekas tambang timah di Kecamatan Bakam, Provinsi Bangka Belitung. Sylva J Ilmu-ilmu Kehut. 2019;7(2):78-97.
<https://doi.org/10.32502/sylva.v7i2.1544>
 43. Wibowo HY, Sitawati S. Respon Tanaman Kangkung Darat (*Ipomoea reptans* Poir) dengan Interval Penyiraman pada Pipa Vertikal. Plantropica J Agric Sci. 2017;2(2):148-54.
 44. Khan AS. Role of IAA in Flower Development in Cucurbits under Mercury Stress. Plant Stress. 2008;2(1); 75-77
 45. Tooke F, Ordidge M, Chiurugwi T, Battey N. Mechanisms and function of flower and inflorescence reversion. *Journal of Experimental Botany*. 2005;56(420):2587-2599
<https://doi.org/10.1093/jxb/eri254>
 46. Van-Assche F. Effects of heavy metals on enzyme activity in plants. Plant Cell Environ. 1990;13:31-40. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01304>
 47. Kurniawan B, Duryat, Riniarti M, Yuwono SB. Kemampuan adaptasi tanaman mahoni (*Swietenia macrophylla*) terhadap cemaran merkuri pada tailing penambangan emas skala kecil. J Sylva Lestari. 2019;7(3):359-69. <https://doi.org/10.23960/jsl37359-369>
 48. Compant S, Duffy B, Nowak J, Clément C, Ait Barka E. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. Appl Environ Microbiol. 2005;71(9):4951-9. <https://doi:10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005>
 49. Samain E, Ernenwein C, Aussenac T, Selim S. Effective and durable systemic wheat-induced resistance by a plant-growth-promoting rhizobacteria consortium of *Paenibacillus* sp. strain B2 and *Arthrobacter* spp. strain AA against *Zymoseptoria tritici* and drought stress. Physiological and Molecular Plant Pathology. 2021;119:101830. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101830>
 50. Słomka A, Jędrzejczyk-Korycińska M, Rostański A, Karcz J, Kawalec P, Kuta E. Heavy metals in soil affect reproductive processes more than morphological characters in *Viola tricolor*. Environmental and Experimental Botany.2012;75:204-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.07.003>