© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1561-1571 *ISSN 1829-8907*

Remediasi Lahan Tercemar Residu Bauksit dengan Inokulasi *Bacillus sp.* AI 01 dan Tanaman *Brassica nigra*

Shellita Karo Sekali[1], Cico Jhon Karunia Simamora[2*], Jumiati[1], dan Winardi[1]

[1]Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia
[2]Program Studi Agroteknologi, Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia; e-mail: csomamora@faperta.untan.ac.id

ABSTRAK

Residu bauksit merupakan limbah hasil pengolahan bijih bauksit yang memiliki karakteristik pH tinggi, serta mengandung logam berat, khususnya Aluminium (Al). Alumunium (Al) ini bersifat toksik dan berpotensi mencemari lingkungan, serta menghambat pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, diperlukan upaya remediasi yang efektif, efisien dan berkelanjutan untuk lahan tercemar residu bauksit. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh inokulasi mikroorganisme *Bacillus sp.* AI 01, tanaman *Brassica nigra*, serta penambahan pupuk kandang kotoran sapi terhadap penurunan kadar pencemar residu bauksit, serta menentukan kombinasi dan dosis perlakuan yang paling optimal. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 9 kombinasi perlakuan dan 3 ulangan dalam media polibag selama 19 hari. Waktu tinggal optimum dari beberapa kombinasi menunjukkan kematian pada hari ke-19, sehingga dilakukan pemanenan pada waktu tersebut. Parameter yang diamati meliputi pH tanah, pertumbuhan tanaman (tinggi, jumlah daun dan bobot kering), populasi mikroorganisme (TPC), kadar Aluminium (Al) dalam tanah, serta bioakumulasi Al pada akar tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi penurunan pH tanah dari 10,2 menjadi 5,08 – 8,54, serta penurunan kadar Al tanah dari 0,609 ppm menjadi 0,161 ppm. Selain itu, bioakumulasi Aluminium pada akar tanaman mencapai 0,467 ppm, yang menunjukkan *Brassica nigra* berpotensi sebagai tanaman hiperakumulator. Peningkatan populasi mikroorganisme juga menunjukkan peran aktif *Bacillus sp.* dalam mendukung proses remediasi melalui produksi asam organik. Berdasarkan hasil penelitian, kombinasi *Bacillus sp.* AI 01, *Brassica nigra* dan pupuk kandang kotoran sapi terbukti berpotensi sebagai metode remediasi yang efektif, efisien dan berkelanjutan untuk lahan tercemar residu bauksit.

Kata kunci: bioremediasi, fitoremediasi, residu bauksit, *Bacillus sp., Brassica nigra*, Aluminium

ABSTRACT

Bauxite residue is a byproduct of bauxite ore processing characterized by a high pH and containing heavy metals, particularly aluminum (Al). Aluminum (Al) is toxic and has the potential to contaminate the environment and inhibit plant growth. Therefore, effective, efficient, and sustainable remediation efforts are needed for land contaminated with bauxite residue. This study aims to analyze the effect of inoculation with the microorganism Bacillus sp. AI 01, the plant Brassica nigra, and the addition of cattle manure on the reduction of bauxite residue contaminant levels, as well as to determine the most optimal treatment combination and dosage. The study was conducted experimentally using a Completely Randomized Design (CRD) with 9 treatment combinations and 3 replicates in poly bags over 19 days. The optimal retention time for several combinations showed plant death on the 19th day, so harvesting was conducted at that time. The parameters observed included soil pH, plant growth (height, number of leaves, and dry weight), microorganism population (TPC), aluminum (Al) content in the soil, and Al bioaccumulation in plant roots. The results of the study showed a decrease in soil pH from 10,2 to 5,08–8,54, as well as a decrease in soil Al concentration from ppm to 0,161 ppm. In addition, aluminum bioaccumulation in plant roots reached 0.467 ppm, indicating that Brassica nigra has the potential to serve as a hyperaccumulator plant. The increase in microorganism populations also indicates the active role of Bacillus sp. in supporting the remediation process through the production of organic acids. Based on the research results, the combination of Bacillus sp. AI 01, Brassica nigra, and cattle manure has proven to be a potentially effective, efficient, and sustainable remediation method for land contaminated with bauxite residues.

***Keywords*:** bioremediation, phytoremediation, bauxite residues, *Bacillus sp., Brassica nigra,* Aluminum

Citation: Sekali, S. K., Simamora, C. J. K., Jumiati, dan Winardi. (2026). Remediasi Lahan Tercemar Residu Bauksit dengan Inokulasi *Bacillus sp.* AI 01 dan Tanaman *Brassica nigra*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1561-1571, doi:10.14710/jil.24.6.1561-1571

1. PENDAHULUAN

Industri pengolahan bauksit menjadi alumina dari bijih bauksit menghasilkan limbah proses ekstraksi berupa residu bauksit (bauxite residue). Setiap ton alumina yang diproduksi dapat menghasilkan sekitar 1 - 1,5 ton residu bauksit (Wang dkk., 2019). Residu ini memiliki sifat basa yang tinggi (pH >10) dan mengandung berbagai logam berat (Zampieri, 2019).

Logam berat yang terkandung di dalam residu bauksit ini adalah Aluminium (Al) sebesar 0.609 ppm (Analisis Spektrofotometer UV-Vis, 2026). Aluminium dipilih sebagai parameter utama pencemar dalam residu bauksit karena konsentrasinya yang dominan. Alumunium (Al) bersifat sangat fitotoksik yang dimana dapat menghambat pertumbuhan akar, mengganggu penyerapan hara dan merusak struktur sel tanaman (Domínguez-Renedo dkk., 2019). Selain itu, paparan kronis terhadap logam Aluminium terbukti berdampak buruk terhadap kesehatan masyarakat, terutama anak-anak, sebagaimana ditunjukkan melalui pengujian ekskresi fluor yang terkait dengan kontaminasi logam Aluminium dalam urin mereka (Grebenshchikova dkk., 2021).

Pengelolaan residu bauksit merupakan tantangan besar bagi lingkungan karena, mengandung pH tinggi dan kandungan natrium yang berlebihan dapat merusak ekosistem tanah, mengurangi biodiversitas mikroorganisme dan membahayakan pertumbuhan tanaman yang menyebabkan kerusakan jangka panjang pada ekosistem sekitarnya (Zampieri, 2019). Upaya mencari pendekatan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi salah satu strategi yang menjanjikan yaitu dengan inokulasi agen biologis seperti bakteri dan tanaman hiperakumulator. Penelitian ini dirancang untuk menguji kombinasi antara mikroorganisme *Bacillus sp.* AI 01 dan tanaman *Brassica nigra* dalam remediasi lahan yang tercemar residu bauksit.

Brassica nigra merupakan salah satu tanaman yang berpotensi untuk akumulator yang memiliki toleransi terhadap logam berat seperti Al, Pb, Cd, dan As. Tanaman ini mampu menyerap logam dari tanah dan mengakumulasikannya ke jaringan melalui mekanisme fitoekstraksi tanah (McGrath & Zhao, 2003). Tanaman *Brassica nigra* tidak hanya mampu menurunkan kandungan logam berat dalam tanah, tetapi juga berperan memperbaiki struktur dan kesuburan tanah melalui pelepasan eksudat akar (Meena dkk., 2023).

Bakteri *Bacillus sp.* terbukti memiliki peran penting dalam menurunkan pH tanah melalui produksi asam organik, meningkatkan kelarutan logam berat, dan memfasilitasi proses fitoremediasi. Strain *Bacillus thuringiensis* EEEL02, mampu menurunkan pH residu bauksit dari 10,26 menjadi 5,62 hanya dalam waktu 5 hari melalui fermentasi asam. Inokulasi mikroba seperti ini dapat memperkuat efisiensi tanaman hiperakumulator dalam menyerap logam berat melalui sistem akar, sekaligus mempercepat pemulihan struktur tanah (Wu dkk., 2019).

Pendekatan yang potensial untuk remediasi lahan tercemar residu bauksit adalah kombinasi antara mikroorganisme seperti *Bacillus sp.*, tanaman *Brassica nigra* dan bahan organik yang berasal dari pupuk kandang berbahan dasar kotoran sapi. Pupuk kandang berbahan dasar kotoran sapi berfungsi sebagai stimulan organik yang meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), kandungan bahan organik dan kelembaban tanah. Aplikasi pupuk ini terbukti mampu menurunkan pH tanah alkali sebesar 0.6 – 2.22%, serta meningkatkan porositas dan retensi air. Sehingga, mendukung pertumbuhan mikroorganisme dan tanaman remediasi. Selain itu, bahan organik dari pupuk kandang kotoran sapi juga menyediakan substrat bagi aktivitas mikroorganisme fermentatif seperti *Bacillus sp.*, sehingga memperkuat sinergi antara ketiganya dalam sistem remediasi (Zhang dkk., 2025).

Teknologi yang menginokulasikan penggunaan mikroorganisme *Bacillus sp.* AI 01 dan tanaman *Brassica nigra* untuk pemulihan lahan tercemar residu bauksit masih terbatas (Marini dkk., 2021). Teknologi inokulasi ini dapat meningkatkan efektivitas remediasi pada lahan tercemar residu bauksit. Oleh karena itu, pengujian potensi kombinasi *Bacillus sp.* AI 01, tanaman *Brassica nigra* dan pupuk kandang kotoran sapi dalam penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan solusi remediasi yang lebih optimal, efisien dan berkelanjutan untuk lahan tercemar residu bauksit (Saharan dkk., 2023).

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian sistem remediasi terpadu yang mengombinasikan inokulasi *Bacillus* sp. AI 01, tanaman *Brassica nigra*, dan pupuk kandang kotoran sapi melalui rancangan acak lengkap (RAL) faktorial dengan sembilan kombinasi perlakuan. Efektivitas setiap kombinasi dievaluasi berdasarkan perubahan pH dan konsentrasi Al tanah, akumulasi Al pada akar, populasi mikroorganisme, serta pertumbuhan tanaman yang meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan bobot kering selama 19 hari pengamatan. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi kombinasi dosis inokulum bakteri dan pupuk kandang yang memberikan hasil terbaik serta memberikan informasi mengenai potensi remediasi biologis pada lahan tercemar residu bauksit.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama kurang lebih 3 bulan pada lahan yang berlokasi di Jalan Reformasi, Gang Pertanian, Kecamatan Pontianak Tenggara, Kota Pontianak, Provinsi Kalimantan Barat, Indonesia dengan titik koordinat 0°03'53.0"S dan 109°20'14.8"E. Pengujian sampel pH tanah *(In-situ)*, kandungan Alumunium dalam tanah, kandungan Alumunium akar tanaman, dan Total Plate Count (TPC) dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Teknik Lingkungan Universitas Tanjungpura. Lokasi pengambilan sampel residu bauksit dilakukan di

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Smelter Bauksit Grade Alumina Refinery (SGAR) PT. Borneo Alumina Indonesia (BAI) yang terletak di Desa Bukit Batu, Kecamatan Sungai Kunyit, Kabupaten Mempawah, Provinsi Kalimantan Barat. Secara geografis PT. Borneo Alumina Indonesia terletak antara 0°30'56,24" LU dan 108°57'4,25" BT.

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan eksperimen kuantitatif deskriptif menggunakan sistem remediasi dengan inokulasi mikroorganisme *Bacillus sp.* AI 01, tanaman *Brassica nigra* dan penambahan pupuk kandang kotoran sapi sebagai sumber nutrien. Metode remediasi ini menerapkan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas 9 kombinasi perlakuan dengan 3 ulangan. Pengamatan dilakukan pada dua waktu, yaitu hari ke-0 dan hari ke-19. Karena, pengambilan sampel dilakukan secara destruktif, setiap waktu pengamatan menggunakan polybag yang berbeda. Dengan demikian, jumlah unit percobaan yang digunakan adalah 9 perlakuan × 3 ulangan × 2 waktu pengamatan = 54 polybag. Residu bauksit yang digunakan sebanyak 54 kg, yang dimana tiap polybag ukuran 15 x 15 cm diisi 1 kg residu bauksit dan dilakukan 9 perlakuan yang berbeda.

2.3. Sampling

Teknik pengambilan sampel tanah residu bauksit dalam penelitian ini dilakukan dengan metode sampel terganggu berdasarkan acuan SNI 6371:2015 tentang tata cara pengambilan dan klasifikasi tanah untuk keperluan teknik. Prosedur pengambilan dilakukan secara komposit dari lima titik sampling yang tersebar secara sistematis di lokasi penimbunan residu, pada kedalaman 25 cm. Sampel dari tiap titik diambil sebanyak 12 kg menggunakan sekop, kemudian dicampur merata untuk memperoleh satu sampel komposit seberat 60 kg. Seluruh peralatan sampling terlebih dahulu disterilkan menggunakan alkohol 70% guna menghindari terjadinya kontaminasi silang antar titik pengambilan sampel. Penggunaan sampel komposit bertujuan untuk memperoleh sampel yang merepresentasikan karakteristik umum residu bauksit pada lokasi penelitian. Namun, penggabungan tersebut menyebabkan variasi karakteristik residu bauksit antar titik pengambilan sampel tidak dapat dievaluasi secara terpisah. Sampel dibawa menggunakan pickup yang ditutup terpal selama transportasi ke Pontianak (Hua dkk., 2017).

2.4. Pembibitan Tanaman *Brassica nigra*

Pembibitan tanaman *Brassica nigra* yang dilakukan pada penelitian ini yaitu, benih tanaman *Brassica nigra* direndam dalam air dan dipilih benih yang tenggelam (Meena dkk., 2023). Kemudian, benih disemai dalam tray penyemaian berisi media pupuk kandang kotoran sapi dan tanah subur dengan rasio 1:1 (Glick, 2010). Setelah itu, bibit yang telah mencapai tinggi ±5 cm dan menghasilkan 3–4 daun sejati (25 hari), setelah fase kotiledon. Kemudian, dipindahkan ke polybag eksperimen yang telah berisi masing-masing perlakuan di Lahan.

2.5. Peremajaan Isolat *Bacillus sp.* AI 01 pada Media TSA

Peremajaan isolat bertujuan untuk mengaktifkan kembali isolat *Bacillus sp.* AI 01 yang diambil dari lingkungan aslinya, sehingga didapatkan koloni segar dan aktif untuk proses lanjutan. Tahapan dimulai dengan menyiapkan media TSA yang dibuat dengan mencampurkan 55 g/L pepton, 2,5 g/L glukosa, 5 g/L NaCl, 2,5 g/L K2HPO4, dan 20 g/L bubuk agar dalam 1 L akuades. Campuran kemudian diaduk dan dipanaskan sampai homogen, selanjutnya disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C dengan tekanan 15 psi selama 15 menit. Setelah proses sterilisasi selesai, media didinginkan hingga bersuhu 45–50°C sebelum dituangkan ke dalam tabung reaksi steril secara aseptik, lalu didiamkan sampai memadat. TSA sangat sesuai untuk kultur *Bacillus sp.* AI 01 karena mendukung aktivitas metabolik optimal, bahkan pada kondisi pH yang tinggi seperti pada media hasil bioremediasi residu bauksit. Selanjutnya, isolat Bacillus sp. AI 01 sebanyak 1 ose diambil dari kultur stok menggunakan jarum ose steril, kemudian digoreskan secara zig-zag pada permukaan media TSA. Proses inokulasi dilakukan di dalam Laminar Air Flow dengan bantuan nyala bunsen guna mempertahankan kondisi aseptik. Tabung reaksi selanjutnya diinkubasi pada suhu ruang selama 24 jam. Setelah proses inkubasi selesai, pertumbuhan koloni kemudian diamati. Sehingga, mendapatkan koloni tunggal yang sehat serta memiliki morfologi khas *Bacillus* (memiliki gram positif dan berbentuk batang) dan dipilih sebagai inokulum untuk tahap selanjutnya (Wu dkk., 2019).

2.6. Pembuatan Starter *Bacillus sp.* AI 01 pada Media TSB

Pembuatan starter *Bacillus sp.* AI 01 bertujuan untuk memperoleh kultur aktif dalam bentuk cair dengan jumlah populasi mikroba yang cukup sebagai isolat dalam proses bioremediasi atau aplikasi lainnya. Media yang digunakan adalah TSB yang merupakan media peremajaannya dalam menumbuhan bakteri *Bacillus*, karena mengandung peptone sebagai sumber nitrogen dan karbon. Prosedur dimulai dengan menimbang 55 g/L pepton, 2,5 g/L glukosa, 5 g/L NaCl, dan 2,5 g/L K2HPO4 kedalam 2 L akuades. selanjutnya disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C dengan tekanan 15 psi selama 15 menit. Setelah, media didinginkan hingga suhu ruang. Kemudian, diambil sebanyak 2-3 ose dari isolat *Bacillus sp.* AI 01 yang telah diremajakan sebelumnya pada media TSA diinokulasikan ke dalam media TSB menggunakan jarum ose steril. Kultur ini kemudian diinkubasi pada suhu ruang selama 48 jam dalam kondisi aerob, sesuai dengan karakteristik *Bacillus sp.* yang merupakan bakteri aerob. Setelah proses inkubasi selesai, starter dilarutkan dalam akuades steril, kemudian

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

pertumbuhan mikroorganisme dievaluasi berdasarkan konsentrasi sel yang diukur menggunakan Spektrofotometer UV-VIS pada panjang gelombang 600 nm (OD_{600}). Kultur starter dianggap siap digunakan apabila mencapai nilai OD_{600} atau nilai absorbansi pada Spektrofotometer UV-VIS sekitar 0,8, yang menandakan bahwa bakteri berada pada fase eksponensial dan memiliki aktivitas metabolik maksimum (Wang dkk., 2019).

2.7. Eksperimen Percobaan

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan rancangan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial. Perlakuan yang diterapkan dalam penelitian ini terdiri dari 2 faktor yaitu dosis pemberian pupuk kandang kotoran sapi (k) dan dosis pemberian isolat *Bacillus sp.* AI 01 (t) dengan masing-masing 3 taraf perlakuan. Penelitian ini tidak menggunakan perlakuan kontrol tanpa tanaman, sehingga seluruh unit percobaan menggunakan tanaman *Brassica nigra*. Perlakuan yang dimaksud sebagai berikut:

Faktor pertama berupa dosis pemberian pupuk kandang kotoran sapi (k) yang terdiri atas 3 taraf, yaitu (Zhang dkk., 2025):
k0 = tanpa dosis
k1 = 15% setara dengan 150 g/kg tanah
k2 = 20% setara dengan 200 g/kg tanah.

Faktor kedua dosis berupa dosis pemberian isolat *Bacillus sp.* AI 01 (t) terdiri dari 3 taraf, yaitu (Zhang dkk., 2025):
t0 = tanpa dosis
t1 = 13% setara dengan 130 mL/kg
t2 = 18% setara dengan 180 mL/kg

Dengan demikian, penelitian ini mencakup 9 kombinasi perlakuan yang merupakan hasil kombinasi antara dosis pupuk kandang kotoran sapi dan pemberian isolat *Bacillus sp.* AI 01. Rincian kombinasi perlakuan tersebut ditampilkan pada **Tabel 1.**

Tabel 1. Kombinasi Pupuk Kotoran Sapi dan Isolat *Bacillus sp.* AI 01

Pupuk Kotoran Sapi (k)	Isolat *Bacillus sp.* AI 01 (t)		
	t_0	t_1	t_2
k_0	k_0t_0	k_0t_1	k_0t_2
k_1	k_1t_0	k_1t_1	k_1t_2
k_2	k_2t_0	k_2t_1	k_2t_2

2.8. Analisis Data

Analisis data statistik untuk variabel penelitian dilakukan menggunakan analisis keragaman percobaan dengan metode Anova Two Way. Uji nyata analisis keragaman dilakukan dengan melihat nilai F hitung dengan F tabel yang dibandingkan pada taraf nyata 5%. Hasil perbandingan antara F hitung dengan F tabel 5% mempunyai kemungkinan yang dapat terjadi yaitu (Rufaedah dkk., 2022):

1. Jika F hitung ≤ F tabel 5%, maka tidak terdapat pengaruh signifikan antar perlakuan terhadap parameter yang diamati.
2. Jika F hitung > F tabel 5%, maka terdapat pengaruh signifikan antar perlakuan terhadap parameter yang diamati.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. pH (Derajat Keasaman)

Nilai pH mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman *Brassica nigra*, karena menentukan tingkat toksisitas logam (Dikkeh dkk., 2024). Kondisi pH pada kesembilan kombinasi memiliki kecenderungan yang berbeda. Rata-rata pH hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) kesembilan kombinasi berkisar 7.58 – 10.0 yang terus menurun hingga pada hari ke-19 menjadi 5.08 – 8.54. Berikut grafik nilai pH selama proses remediasi dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Berdasarkan **Gambar 1**, nilai pH setiap kombinasi memiliki kecenderungan yang berbeda. Pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) perlakuan K1T1, K1T2, K2T0, K2T1, dan K2T2 nilai pH optimal rata-rata berkisar 7.58. Kemudian, pada hari ke-3 hingga hari ke-7 perlakuan K1T0, K1T1, K1T2, K2T0, K2T1, dan K2T2 nilai pH optimal rata-rata berkisar 7.58 – 7.75. Pada hari ke-9 perlakuan K1T0, K1T1, K1T2, K2T0, K2T1, dan K2T2 nilai pH optimal berkisar 6.08 – 7.08. Pengamatan pada hari ke-11 hingga hari ke-19 perlakuan K1T0, K1T1, K1T2, K2T0, K2T1, dan K2T2 nilai pH menjadi asam rata-rata berkisar 5.08 – 5.75. Hasil pH yang optimal pada hari ke-19 terdapat pada perlakuan K0T2 dengan rata-rata nilai berkisar 6.88. Hal tersebut terjadi disebabkan oleh inokulasi *Bacillus sp.* AI 01 yang mampu menghasilkan metabolit organik yang menurunkan pH tanah (Marini dkk., 2021). Selain itu, tanaman *Brassica nigra* mampu mengurangi alkalinitas tanah dengan menghasilkan asam organik yang dapat menurunkan pH agar lebih sesuai bagi pertumbuhan tanaman (Zeremski dkk., 2021).

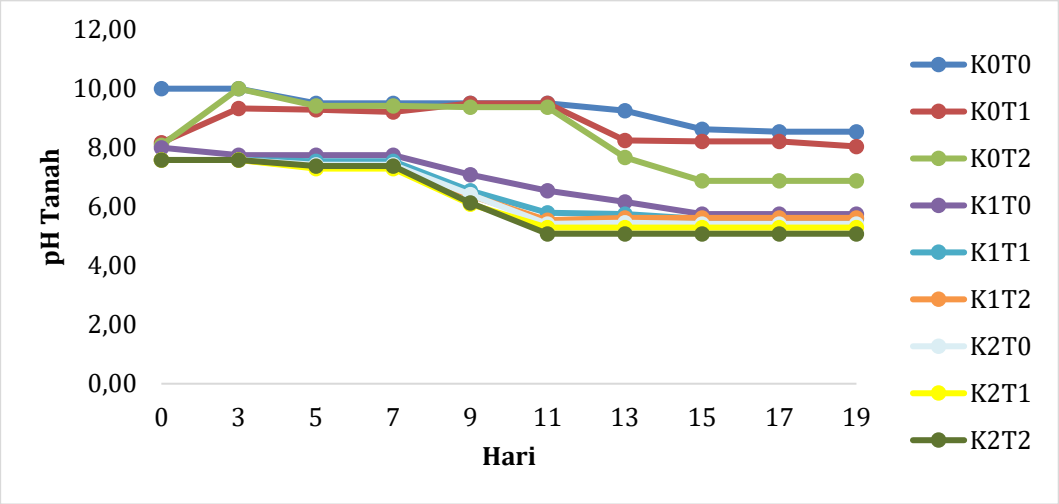
Berdasarkan **Tabel 2**, hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa nilai F hitung > F tabel 5% memberikan pengaruh yang nyata pada perlakuan pemberian pupuk kandang kotoran sapi, isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 maupun interaksi antar keduanya terhadap perubahan pH tanah. Namun, pada hari ke-5, ke-7, ke-9, dan ke-11 bahwa nilai F hitung < F tabel 5% menunjukkan pengaruh yang tidak nyata pada perlakuan interaksi antar bakteri dan pupuk. Kemudian, nilai KK% (Koefisien Keragaman) dalam hasil menunjukkan nilai ketelitian dan homogen data. Semakin kecil angkanya maka semakin baik hasilnya. Pengaruh nyata ini menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan mampu menstabilkan pH media residu bauksit. Perubahan nilai pH ini dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme serta interaksi antara tanaman *Brassica nigra* dengan media tanah residu bauksit. Tanaman *Brassica nigra* mengandung berbagai senyawa organik yang dapat berinteraksi dengan mikroorganisme tanah dan membantu reaksi kimia di dalamnya Selain itu, aktivitas mikroorganisme tanah diketahui mampu menghasilkan senyawa seperti asam organik yang

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

dapat mempengaruhi keseimbangan kimia tanah (Glick, 2010).

3.2. Pertumbuhan Tinggi Tanaman *Brassica nigra*

Nilai tinggi tanaman mencerminkan respon pertumbuhan dan perkembangan *Brassica nigra* terhadap kondisi media selama proses percobaan. Pertambahan tinggi pada kesembilan kombinasi perlakuan menunjukkan kecenderungan yang seragam, meskipun terdapat perbedaan antar perlakuan yang dipengaruhi oleh kondisi awal bibit saat penyemaian dan pemindahan tanam. Rata-rata tinggi tanaman pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) berkisar 3.22 – 3.39 cm dan terus meningkat hingga hari ke-19 menjadi 5.0 – 6.50 cm. Grafik perubahan tinggi tanaman selama proses percobaan dapat dilihat pada **Gambar 2.**

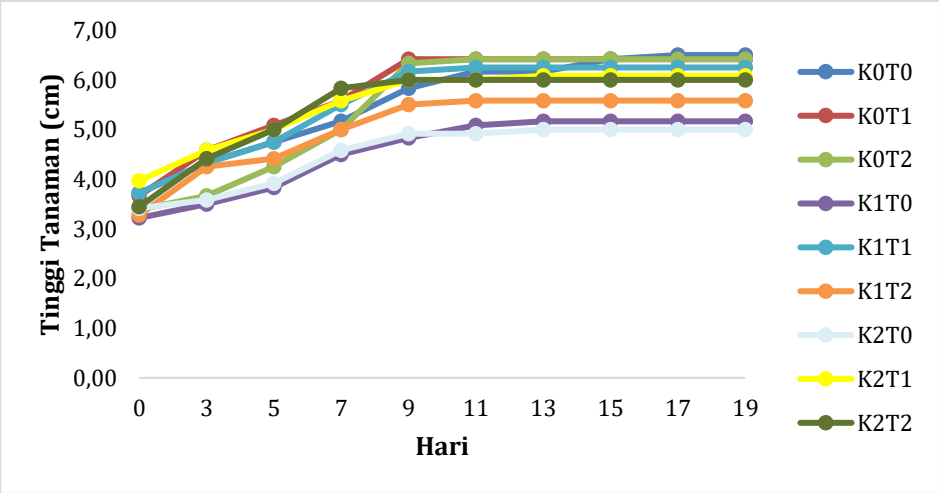


Gambar 1. Data Perubahan pH Selama Proses Percobaan

Tabel 2. Data Uji ANOVA *Two Way* pH

Sumber Keragaman	DB	F-hitung										F Tabel 5%
		pH Hari ke-0	pH Hari ke-3	pH Hari ke-5	pH Hari ke-7	pH Hari ke-9	pH Hari ke-11	pH Hari ke-13	pH Hari ke-15	pH Hari ke-17	pH Hari ke-19	
Kompos	2	631,60	1014,50	827,79	536,36	536,36	829,71	226,98	464,18	428,67	468,06	3,55
Bakteri	2	302,80	14,00	7,04	5,53	5,53	10,40	14,70	32,31	28,63	31,64	3,55
Kompos & Bakteri	4	167,80	10,00	2,79^{tn}	2,28^{tn}	2,28^{tn}	2,64^{tn}	3,09	17,066	14,98	15,75	2,93
Galat	18											
Total	27											
KK%		0,0042	0,0093	0,0095	0,0143	0,0251	0,0399	0,0929	0,0349	0,0370	0,0324	

Keterangan: ^{tn}berpengaruh tidak signifikan



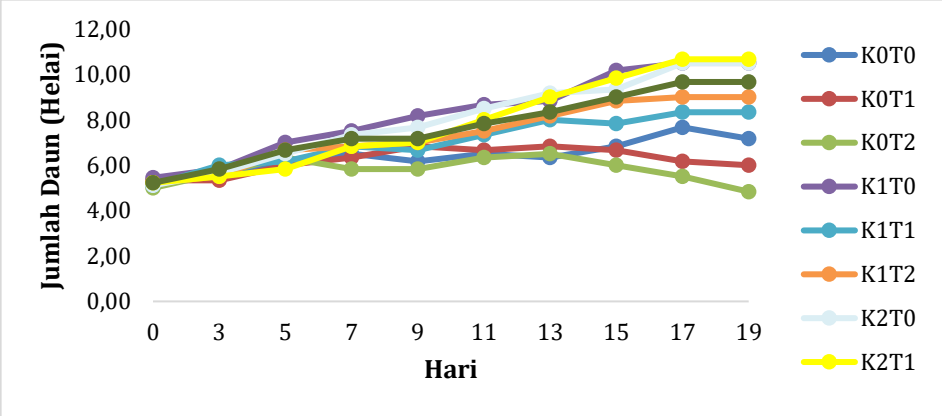
Gambar 2. Data Perubahan Tinggi Tanaman Selama Proses Percobaan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 3. Data Uji ANOVA *Two Way* Tinggi Tanaman

Sumber Keragaman	DB	F-hitung										F Tabel 5%
		Tinggi Hari ke-0	Tinggi Hari ke-3	Tinggi Hari ke-5	Tinggi Hari ke-7	Tinggi Hari ke-9	Tinggi Hari ke-11	Tinggi Hari ke-13	Tinggi Hari ke-15	Tinggi Hari ke-17	Tinggi Hari ke-19	
Kompos	2	0,131^{tn}	0,094^{tn}	0,302^{tn}	0,168^{tn}	0,884^{tn}	1,047^{tn}	0,895^{tn}	1,138^{tn}	1,215^{tn}	1,215^{tn}	3,55
Bakteri	2	0,992^{tn}	1,223^{tn}	1,207^{tn}	0,933^{tn}	1,773^{tn}	1,213^{tn}	1,070^{tn}	0,846^{tn}	0,772^{tn}	0,772^{tn}	3,55
Kompos & Bakteri	4	0,342^{tn}	0,604^{tn}	0,437^{tn}	0,256^{tn}	0,134^{tn}	0,213^{tn}	0,181^{tn}	0,271^{tn}	0,305^{tn}	0,305^{tn}	2,93
Galat	18											
Total	27											
KK%		0,4876	1,2095	1,3748	1,7283	1,3221	1,3078	1,3475	1,3412	1,3498	1,7803	

Keterangan: ^{tn}berpengaruh tidak signifikan



Gambar 3. Data Perubahan Jumlah Daun Tanaman Selama Proses Percobaan

Tabel 4. Data Uji ANOVA *Two Way* Jumlah Daun Tanaman

Sumber Keragaman	DB	F-hitung										F Tabel 5%
		Jumlah Daun Hari ke-0	Jumlah Daun Hari ke-3	Jumlah Daun Hari ke-5	Jumlah Daun Hari ke-7	Jumlah Daun Hari ke-9	Jumlah Daun Hari ke-11	Jumlah Daun Hari ke-13	Jumlah Daun Hari ke-15	Jumlah Daun Hari ke-17	Jumlah Daun Hari ke-19	
Kompos	2	0,28^{tn}	0,667^{tn}	2,042^{tn}	4,918	4,438	7,357	16,011	12,379	14,447	17,893	3,55
Bakteri	2	0,16^{tn}	0,167^{tn}	4,167	1,490^{tn}	1,603^{tn}	1,265^{tn}	0,563^{tn}	0,995^{tn}	2,267^{tn}	2,254^{tn}	3,55
Kompos & Bakteri	4	0,82^{tn}	1,083^{tn}	0,604^{tn}	0,357^{tn}	1,418^{tn}	0,485^{tn}	0,563^{tn}	0,987^{tn}	0,541^{tn}	0,588^{tn}	2,93
Galat	18											
Total	27											
KK%		0,1100	0,1637	0,1936	0,3709	0,5408	0,6738	0,5663	1,1807	1,5788	1,6428	

Keterangan: ^{tn}berpengaruh tidak signifikan

Berdasarkan **Gambar 2**, tinggi tanaman pada setiap kombinasi perlakuan menunjukkan kecenderungan yang seragam. Pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) seluruh perlakuan memiliki rata-rata tinggi awal yang relatif seragam dengan rata-rata tinggi tanaman 3.22 – 3.39 cm. Tinggi tanaman terus meningkat hingga hari ke-9 dengan nilai rata-rata 4.83 – 6.42 cm. Pengamatan pada hari ke-11 hingga hari ke-19 menunjukkan bahwa peningkatan tinggi tanaman mulai melambat, disebabkan adanya kandungan logam yang terdapat pada jaringan tanaman (Zeremski dkk., 2021).

Berdasarkan **Tabel 3**, hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa nilai F hitung < F tabel 5%, yang berarti bahwa pemberian pupuk kandang kotoran sapi, isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01, serta interaksi keduanya tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap pertumbuhan tinggi tanaman *Brassica nigra*. Kemudian, nilai KK% (Koefisien Keragaman) dalam hasil menunjukkan nilai ketelitian dan homogen data. Semakin kecil angkanya maka semakin baik hasilnya. Pengaruh nyata ini menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan mampu meningkatkan pertumbuhan tinggi tanaman *Brassica nigra*. Peningkatan tinggi tanaman dipengaruhi oleh kemampuan tanaman dalam beradaptasi terhadap kondisi tanah serta adanya peran mikroorganisme yang membantu meningkatkan ketersediaan unsur hara (Glick, 2010).

3.3. Pertumbuhan Jumlah Daun Tanaman *Brassica nigra*

Nilai jumlah daun mencerminkan respon pertumbuhan vegetatif *Brassica nigra* terhadap kondisi media selama proses percobaan. Pertambahan jumlah daun pada kesembilan kombinasi perlakuan menunjukkan kecenderungan yang relatif seragam, meskipun terdapat perbedaan antar perlakuan yang dipengaruhi oleh kondisi awal bibit saat penyemaian dan pemindahan tanam. Rata-rata jumlah daun pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) berkisar 5.0 – 5.44 helai dan terus meningkat hingga hari ke-19 menjadi 6.0 – 10.67 helai. Namun,

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

pada perlakuan K0T2 terjadi penurunan jumlah daun menjadi 4.83, disebabkan adanya kandungan logam yang terdapat pada jaringan tanaman (Zeremski dkk., 2021). Grafik perubahan jumlah daun selama proses percobaan dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Berdasarkan **Gambar 3**, jumlah daun pada setiap kombinasi perlakuan menunjukkan pola peningkatan yang konsisten. Pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak), seluruh perlakuan memiliki jumlah daun awal yang relatif seragam. Jumlah daun terus bertambah hingga hari ke-9 seiring dengan fase pertumbuhan vegetatif aktif. Pupuk organik dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman, termasuk pembentukan daun (Zhang dkk., 2025). Pengamatan pada hari ke-11 hingga hari ke-19 menunjukkan bahwa pertambahan jumlah daun mulai melambat bahkan menurun, yang disebabkan oleh pengaruh kandungan logam pada jaringan tanaman serta penyesuaian fisiologis tanaman terhadap kondisi media selama proses percobaan (Zeremski dkk., 2021).

Berdasarkan **Tabel 4**, hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa nilai F hitung > F tabel 5% memberikan pengaruh yang nyata pada perlakuan pemberian pupuk kandang kotoran sapi, isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 maupun interaksi antar keduanya terhadap pertumbuhan jumlah daun tanaman *Brassica nigra*. Sementara, nilai F hitung < F tabel 5% memberikan pengaruh yang tidak nyata pada perlakuan pemberian pupuk kandang kotoran sapi, isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 maupun interaksi antar keduanya terhadap pertumbuhan jumlah daun tanaman *Brassica nigra*. Kemudian, nilai KK% (Koefisien Keragaman) dalam hasil menunjukkan nilai ketelitian dan homogen data. Semakin kecil angkanya maka semakin baik hasilnya. Adanya pengaruh nyata tersebut menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan dapat meningkatkan jumlah daun pada tanaman *Brassica nigra*. Perlakuan yang menghasilkan jumlah daun lebih banyak mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan serta ketersediaan unsur hara yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme dan penambahan pupuk kandang kotoran sapi dalam media tanam berperan dalam mendukung perkembangan daun tanaman (Glick, 2010).

3.4. Pertumbuhan Mikroorganisme

Nilai Total Plate Count (TPC) mencerminkan dinamika populasi mikroorganisme selama proses percobaan berlangsung. Perubahan jumlah mikroorganisme pada kesembilan kombinasi perlakuan menunjukkan adanya respon biologis terhadap kondisi media tanam yang berbeda. Terjadi peningkatan maupun penurunan jumlah mikroorganisme dari hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) hingga hari ke-19 pada perlakuan. Data pertumbuhan mikroorganisme selama proses percobaan dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Data Pertumbuhan Mikroorganisme Selama Proses Percobaan

No.	Kode Perlakuan	Satuan	Hari ke-0	Hari ke-19
1	K0T0	CFU/ml	4.85×10^7	7.1×10^7
2	K0T1	CFU/ml	2.9×10^7	1.35×10^7
3	K0T2	CFU/ml	7.65×10^7	2.05×10^7
4	K1T0	CFU/ml	0.8×10^7	16.5×10^7
5	K1T1	CFU/ml	0.65×10^7	16.9×10^7
6	K1T2	CFU/ml	3.65×10^7	7.6×10^7
7	K2T0	CFU/ml	8.65×10^7	13.05×10^7
8	K2T1	CFU/ml	0.2×10^7	3.2×10^7
9	K2T2	CFU/ml	18.35×10^7	1×10^7

Sumber data diuji laboratorium

Berdasarkan **Tabel 5**, hasil pengukuran mikroorganisme menunjukan bahwa selama 19 hari percobaan sebagian besar perlakuan mengalami peningkatan. Pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak), populasi mikroorganisme berkisar antara $\pm 1 \times 10^7$ hingga 18.35×10^7 CFU/ml. Perlakuan dengan populasi tertinggi terlihat pada perlakuan K2T2 berkisar 18.35×10^7 CFU/ml, sedangkan perlakuan lain menunjukkan populasi lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pada awal pengamatan mikroorganisme masih berada dalam fase adaptasi terhadap media tanam. Pada hari ke-19 percobaan, populasi mikroorganisme pada sebagian perlakuan mengalami peningkatan dan penurunan. Penurunan ini disebabkan oleh keterbatasan nutrisi, perubahan kondisi kimia tanah, dan meningkatnya tekanan lingkungan selama proses percobaan. Selain itu, peningkatan yang terjadi menunjukkan bahwa kondisi media mulai mendukung aktivitas metabolik bakteri (Wu dkk., 2019).

Nilai pH residu bauksit berperan penting dalam mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Kondisi pH yang mendekati kisaran toleransi bakteri akan meningkatkan aktivitas enzimatik, transport membran, serta keseimbangan reaksi metabolisme sel. Sebaliknya, pH yang terlalu ekstrem dapat menghambat aktivitas fisiologis mikroorganisme (Zhang dkk., 2025). Peningkatan populasi mikroorganisme berkaitan dengan kemampuan *Bacillus sp.* AI 01 dalam menghasilkan asam organik yang membantu menurunkan alkalinitas media, sehingga menciptakan kondisi yang lebih kondusif bagi pertumbuhan bakteri.

3.5. Kadar Al di Tanah

Kadar Al di tanah mencerminkan dinamika perubahan kandungan logam selama proses percobaan berlangsung. Berdasarkan tabel, kadar Al tanah pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) berkisar antara 0.1488 – 0.1748 ppm. Pada hari ke-19 kadar Al di tanah berkisar antara 0.1619 – 0.1805 ppm. Variasi kadar Al pada pengamatan hari ke-0 relatif lebih tinggi pada sebagian perlakuan dari pada pengamatan hari ke-19. Data perubahan kadar Al di tanah selama percobaan dapat dilihat pada **Tabel 6**.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 6. Data Perubahan Kadar Al Tanah Selama Proses Percobaan

No.	Kode Perlakuan	Satuan	Hari ke-0	Hari ke-19
1	K0T0	ppm	0.1547	0.1697
2	K0T1	ppm	0.1649	0.1619
3	K0T2	ppm	0.1714	0.1805
4	K1T0	ppm	0.1746	0.1649
5	K1T1	ppm	0.1748	0.1720
6	K1T2	ppm	0.1773	0.1682
7	K2T0	ppm	0.1530	0.1719
8	K2T1	ppm	0.1725	0.1699
9	K2T2	ppm	0.1488	0.1754

Sumber data diuji laboratorium

Berdasarkan **Tabel 6**, sebagian perlakuan pada hari ke-19 kadar Al di dalam tanah menjadi turun. Pada perlakuan K0T1, K1T0, K1T1, K1T2, dan K2T1 kadar Al di tanah terjadi penurunan yang disebabkan oleh kemampuan tanaman *Brassica nigra* dalam menyerap dan mengakumulasikannya pada jaringan akar (Singh dkk., 2015). Namun, pada perlakuan K0T0, K0T2, K2T0, dan K2T2 kadar Al di tanah terjadi peningkatan yang disebabkan oleh perubahan pH tanah selama proses remediasi. Penurunan pH dapat meningkatkan kelarutan Al, sehingga kadar Al ditanah meningkat (Purwanti dkk., 2020).

Tabel 7. Data Uji ANOVA *Two Way* Kadar Al di Tanah

Sumber Keragaman	DB	F-hitung		F Tabel 5%
		Al Tanah Hari ke-0	Al Tanah Hari ke-19	
Kompos	2	3,716	0,117^{tn}	3,55
Bakteri	2	1,151^{tn}	0,391^{tn}	3,55
Kompos & Bakteri	4	1,232^{tn}	0,322^{tn}	2,93
Galat	18			
Total	27			
KK%		0,0257	0,0165	

Keterangan: ^{tn}berpengaruh tidak signifikan

Berdasarkan **Tabel 7**, hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa kadar Al di tanah pada hari ke-0 nilai F hitung < F tabel 5% memberikan pengaruh yang tidak nyata pada perlakuan pemberian isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 dan interaksi antar pemberian pupuk kandang kotoran sapi dan isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 terhadap kadar Al di tanah. Sementara, nilai F hitung > F tabel 5% memberikan pengaruh yang nyata pada perlakuan pemberian pupuk kandang kotoran sapi. Namun, kadar Al di tanah pada hari ke-19 menunjukkan bahwa semua variabel menunjukkan nilai F hitung < F tabel 5% memberikan pengaruh yang tidak nyata. Kemudian, nilai KK% (Koefisien Keragaman) dalam hasil menunjukkan nilai ketelitian dan homogen data. Semakin kecil angkanya maka semakin baik hasilnya. Pengaruh nyata ini menunjukkan bahwa hasil statistik kombinasi perlakuan menurunkan kadar Al di tanah. Kadar Al di tanah terjadi penurunan disebabkan oleh kemampuan tanaman *Brassica nigra* dalam menyerap dan mengakumulasikannya pada jaringan akar (Singh dkk., 2015). Kemudian, terjadinya penurunan pH dapat meningkatkan kelarutan Al di tanaman, sehingga kadar Al ditanah meningkat (Purwanti dkk., 2020).

3.6. Bioakumulasi Al di Akar Tanaman *Brassica nigra*

Akumulasi Al pada akar tanaman mencerminkan kemampuan *Brassica nigra* dalam menyerap dan mentranslokasikan logam dari media tanam. Pada hari ke-0 hingga hari ke-19 terjadi perbedaan kadar akumulasi Al antar perlakuan. Namun, ada beberapa perlakuan pada hari ke-19 justru kadar Al di dalam akar terjadi penurunan. Data perubahan bioakumulasi Al di akar selama remediasi dapat dilihat pada **Tabel 8.**

Tabel 8. Data Perubahan Kadar Al di Akar Selama Proses Percobaan

No.	Kode Perlakuan	Satuan	Hari ke-0	Hari ke-19
1	K0T0	ppm	0.1302	0.3301
2	K0T1	ppm	0.1961	0.2143
3	K0T2	ppm	0.3794	0.1741
4	K1T0	ppm	0.4466	0.2595
5	K1T1	ppm	0.5233	0.2232
6	K1T2	ppm	0.5639	0.2008
7	K2T0	ppm	0.3597	0.2247
8	K2T1	ppm	0.5125	0.4677
9	K2T2	ppm	0.5594	0.3305

Sumber data diuji laboratorium

Berdasarkan **Tabel 8**, sebagian perlakuan pada hari ke-19 justru kadar Al di dalam akar lebih kecil dibandingkan pada hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) yang disebabkan oleh mekanisme toleransi tanaman. Selain itu, rendahnya kandungan Al pada akar tanaman di hari ke-0 diduga disebabkan oleh berbagai kombinasi perlakuan yang melibatkan penambahan isolat *Bacillus sp.* AI 01 serta pupuk kandang kotoran sapi, yang mampu memperbaiki kondisi kimia tanah. Sehingga, mengurangi kemampuan tanaman dalam menyerap Al. Pada perlakuan K0T0 dan K0T1 hari ke-0 (± 12 jam setelah kontak) kadar Al didalam akar tanaman berturut-turut berkisar 0.1302 ppm dan 0.1961 ppm. Kemudian, terjadi kenaikan kadar Al di dalam Akar tanaman berturut-turut berkisar 0.3301 ppm dan 0.2143 ppm yang disebabkan oleh kemampuan tanaman *Brassica nigra* dalam menyerap Al dari tanah dan mengakumulasikannya pada jaringan akar (Meena dkk., 2023). Selain itu, penurunan kadar Al pada akar dapat terjadi akibat proses translokasi logam dari akar menuju bagian tanaman lain, seperti batang dan daun (Ali dkk., 2013).

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 9. Data Uji ANOVA *Two Way* Kadar Al di Akar Tanaman

Sumber Keragaman	DB	F-hitung		F Tabel 5%
		Al Tanaman Hari ke-0	Al Tanaman Hari ke-19	
Kompos	2	-	8,156	3,55
Bakteri	2	-	2,341^{tn}	3,55
Kompos & Bakteri	4	-	6,655	2,93
Galat	18			
Total	27			
KK%		-	0,0825	

Keterangan: ^{tn}berpengaruh tidak signifikan

Berdasarkan **Tabel 9**, hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa akumulasi Al di akar pada hari ke-19 nilai F hitung < F tabel 5% memberikan pengaruh yang tidak nyata pada perlakuan pemberian isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 dan interaksi antar pemberian pupuk kandang kotoran sapi dan isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 terhadap akumulasi kadar Al di akar tanaman. Sementara, nilai F hitung > F tabel 5% memberikan pengaruh yang nyata pada perlakuan pemberian pupuk kandang kotoran sapi. Namun, hasil pada hari ke-0 analisis ragam tidak dapat dilakukan karena seluruh nilai pengamatan memiliki nilai yang sama sehingga tidak terdapat variasi galat (error = 0). Oleh karena itu nilai F dan signifikansi tidak dapat dihitung. Nilai KK% (Koefisien Keragaman) dalam hasil menunjukkan nilai ketelitian dan homogen data. Semakin kecil angkanya makan semakin baik hasilnya. Pengaruh nyata ini menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan mampu mengakumulasi kadar Al di akar tanaman. Kenaikan kadar Al di dalam Akar tanaman disebabkan oleh kemampuan tanaman *Brassica nigra* dalam menyerap Al dari tanah dan mengakumulasikannya pada jaringan akar (Meena dkk., 2023).

3.7. Bobot Kering Tanaman *Brassica nigra*

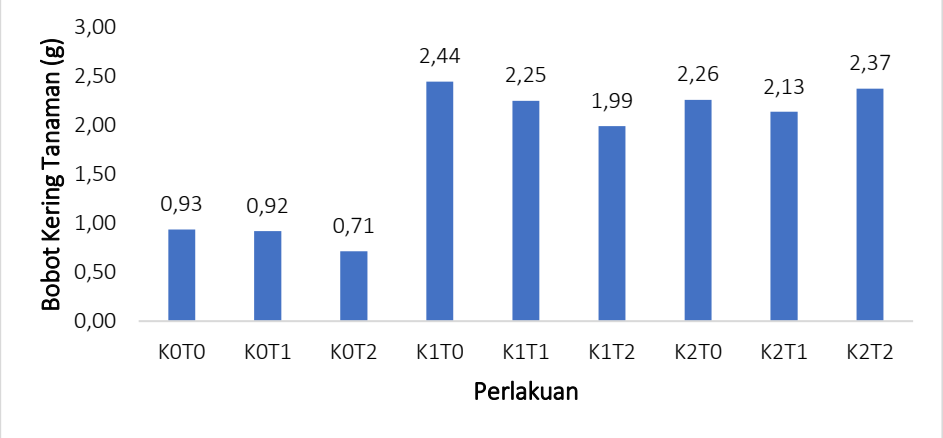
Bobot kering tanaman mencerminkan akumulasi biomassa yang terbentuk sebagai hasil proses fotosintesis dan metabolisme selama periode pertumbuhan. Bobot kering menunjukkan adanya variasi antar kombinasi perlakuan, dimana beberapa perlakuan menghasilkan biomassa lebih tinggi, sedangkan kombinasi lainnya menunjukkan nilai yang lebih rendah. Grafik perbedaan bobot kering tanaman *Brassica nigra* dapat dilihat pada **Gambar 4.**

Berdasarkan **Gambar 4**, bobot kering tanaman dengan rata-rata cukup tinggi terjadi pada perlakuan K1T0, K1T1, K1T2, K2T0, K2T1, dan K2T2 berkisar 1.99 – 2.44 g. Kemudian, bobot kering tanaman dengan rata-rata cukup rendah terjadi pada perlakuan K0T0, K0T1 dan K0T2 berkisar 0.71 – 0.93 g. Perbedaan bobot kering tanaman antar kombinasi perlakuan menunjukkan adanya variasi respon fisiologis *Brassica nigra* terhadap kondisi media residu bauksit selama proses percobaan. Bobot kering juga mencerminkan akumulasi biomassa aktual tanaman tanpa dipengaruhi oleh kandungan air. Hal ini nenunjukkan bahwa kondisi media relatif mendukung pertumbuhan tanaman, yang disebabkan oleh penambahan pupuk kandang kotoran sapi yang berfungsi dalam memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah (Zhang dkk., 2025).

Tabel 10. Data Uji ANOVA Two Way Bobot Kering

Sumber Keragaman	DB	F-hitung	F Tabel 5%
		Bobot Kering	
Kompos	2	42,107	3,55
Bakteri	2	0,581^{tn}	3,55
Kompos & Bakteri	4	0,596^{tn}	2,93
Galat	18		
Total	27		
KK%		0,4270	

Keterangan: ^{tn}berpengaruh tidak signifikan



Gambar 3. Data Perubahan Bobot Kering Tanaman

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Berdasarkan **Tabel 10**, hasil analisis keragaman menunjukkan bahwa nilai F hitung < F tabel 5% memberikan pengaruh yang tidak nyata pada perlakuan pemberian isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 dan interaksi antar pemberian pupuk kandang kotoran sapi dan isolat bakteri *Bacillus sp.* AI 01 terhadap biomassa *Brassica nigra*. Sementara, nilai F hitung > F tabel 5% memberikan pengaruh yang nyata pada perlakuan pemberian pupuk kandang kotoran sapi. Kemudian, nilai KK% (Koefisien Keragaman) dalam hasil menunjukkan nilai ketelitian dan homogen data. Semakin kecil angkanya maka semakin baik hasilnya. Pengaruh nyata ini menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan berpengaruh terhadap biomassa *Brassica nigra*. Perbedaan bobot kering tanaman antar kombinasi perlakuan menunjukkan adanya variasi respon fisiologis *Brassica nigra* terhadap kondisi media residu bauksit selama proses remediasi. Hal ini nenunjukkan bahwa kondisi media relatif mendukung pertumbuhan tanaman, yang disebabkan oleh penambahan pupuk kandang kotoran sapi yang berfungsi dalam memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi tanah (Zhang dkk., 2025).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa aplikasi pupuk kandang kotoran sapi dan isolat bakteri *Bacillus sp.* berpengaruh terhadap perubahan pH tanah, kadar Al dalam tanah, bioakumulasi Al pada akar, serta pertumbuhan tanaman *Brassica nigra*. Beberapa kombinasi perlakuan menunjukkan bahwa *Brassica nigra* memiliki kemampuan menyerap dan mengakumulasi Al dalam jaringan akar, namun efektivitas akumulasi tersebut dipengaruhi oleh pH kondisi media, ketersediaan unsur hara, serta interaksi dengan pupuk kandang dan isolat *Bacillus* sp AI 01. Selanjutnya, pertumbuhan tanaman yang mencakup tinggi tanaman, jumlah daun, dan bobot kering menunjukkan variasi respons pada masing-masing perlakuan.

Berdasarkan hasil pengamatan, kombinasi perlakuan yang menghasilkan nilai terbaik berbeda pada setiap parameter. Perlakuan K0T1 dan K0T2 menunjukkan hasil terbaik dalam penurunan pH tanah, sedangkan K1T0 menghasilkan nilai terbaik untuk kadar Al dalam tanah. Akumulasi Al pada akar terendah ditemukan pada perlakuan K0T0 dan K0T1. Populasi mikroorganisme tertinggi diperoleh pada perlakuan K2T2. Sementara itu, pertumbuhan tanaman berdasarkan tinggi tanaman menunjukkan hasil terbaik pada K0T0, K0T1, dan K0T2, jumlah daun pada K1T0, K2T0, dan K2T1. Serta, bobot kering pada K1T1 dan K1T2. Hasil tersebut menunjukkan adanya variasi respons pada setiap parameter, tetapi nilai terbaik secara deskriptif tidak selalu menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik. Dengan demikian, penentuan perlakuan terbaik perlu mempertimbangkan hasil uji statistik dan tujuan remediasi yang ingin dicapai.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of Heavy Metals-Concepts and Applications. *Chemosphere, 91(7),* 869–881. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075

Dikkeh, M., Hammoud, V., & Ziadeh, M. (2024). Efficiency of Black Mustard *Brassica nigra* L . in Remediating Contaminated Soils with Lead and Cadmium. 145–162. https://doi.org/10.53796/hnsj59/6

Domínguez-Renedo, O., Marta Navarro-Cuñado, A., Ventas-Romay, E., & Asunción Alonso-Lomillo, M. (2019). Determination of Aluminium Using Different Techniques Based On The Al(III)-morin Complex. *Talanta, 196*(November 2018), 131–136. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.12.048

Glick, B. R. (2010). Using Soil Bacteria to Facilitate Phytoremediation. *Biotechnology Advances, 28(3),* 367–374. https://doi.org/10.1016/j.biotecha

Grebenshchikova, V. I., Kuzmin, M. I., Rukavishnikov, V. S., Efimova, N. V., Donskikh, I. V., & Doroshkov, A. A. (2021). Chemical Contamination of Soil on Urban Territories With Aluminum Production in the Baikal Region, Russia. *Air, Soil and Water Research, 14.* https://doi.org/10.1177/11786221211004

Hua, Y., Heal, K. V., & Friesl-Hanl, W. (2017). The Use of Red Mud as An Immobiliser for Metal/Metalloid-Contaminated Soil: A Review. *Journal of Hazardous Materials, 325,* 17–30. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016

Marini, L., Hariyani, S., & Anggraini, I. (2021). Perbaikan Sifat Kimia Red Mud(RM) dengan Menggunakan Bakteri Probiotik. *Rekayasa Teknik Sipil, 2(1),* 1–13. https://doi.org/10.31573/retensi.v2i1.428

McGrath, S. P., & Zhao, F. J. (2003). Phytoextraction of Metals and Metalloids from Contaminated Soils. *Current Opinion in Biotechnology, 14(3),* 277–282. https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00060-0

Meena, S., Chobhe, K. A., Golui, D., Bana, R. S., Gawdiya, S., & Roy, A. (2023). Assessing the Impact of Altered Clay Mineral and Red Mud Derivatives on the Characteristics of Mustard (*B. juncea*) and the Soil Arsenic Content. *International Journal of Plant & Soil Science, 35(19),* 200–206. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193543

Purwanti, I. F., Obenu, A., Tangahu, B. V., Kurniawan, S. B., Imron, M. F., & Abdullah, S. R. S. (2020). Bioaugmentation of Vibrio Alginolyticus in Phytoremediation of Aluminium-contaminated Soil using Scirpus grossus and Thypa angustifolia. *Heliyon, 6(9),* e05004. https://doi.org/10.1016/j.heliyon

Saharan, B. S., Chaudhary, T., Mandal, B. S., Kumar, D., Kumar, R., Sadh, P. K., & Duhan, J. S. (2023). Microbe-Plant Interactions Targeting Metal Stress: New Dimensions for Bioremediation Applications. *Journal of Xenobiotics, 13(2),* 252–269. https://doi.org/10.3390/jox13020019

Singh, D., Singh, V. V., Meena, P. D., Kandpal, B. K., & Kumar, A. (2015). Biology of *Brassica juncea* (Indian Mustard). *Series of Crop Specific Biology Documents,* 1–46. http://moef.gov.in/wp-content/uploads/2018/03

Wang, L., Sun, N., Tang, H., & Sun, W. (2019). A Review on Comprehensive Utilization of Red Mud. *Minerals Engineering, 9(362),* 1–19. https://doi.org/10.3390/min9060362

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Wu, H., Liao, J. xin, Zhu, F., Millar, G., Courtney, R., & Xue, S. guo. (2019). Isolation of an Acid Producing *Bacillus sp.* EEEL02: Potential for Bauxite Residue Neutralization. *Journal of Central South University, 26(2),* 343–352. https://doi.org/10.1007/s11771-019-4006-x

Zampieri, B. D. B. (2019). Overview of Known Alkaliphilic Bacteria from Bauxite Residue*. Journal of Mining and Mechanical Engineering, 1(2),* 41–50. https://doi.org/10.32474/jomme.2019.01.000107

Zeremski, T., Ranđelović, D., Jakovljević, K., Jeromela, A. M., & Milić, S. (2021). Brassica Species in Phytoextractions: Real Potentials and Challenges. *Plants, 10(11),* 1–25. https://doi.org/10.3390/plants10112340

Zhang, X., Yu, Q., Gao, B., Hu, M., Chen, H., Liang, Y., & Yi, H. (2025). Organic Amendments Enhance the Remediation Potential of Economically Important Crops in Weakly Alkaline Heavy Metal-Contaminated Bauxite Residues. *Agriculture (Switzerland), 15(1).* https://doi.org/10.3390/agriculture15010015

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP