BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jagung (*Zea mays* L) adalah salah satu kelompok tanaman kultiviar yang cukup penting secara komersial. Keistimewaan dari komoditas ini adalah dipanen pada saat masih muda, kandungan gula (sukrosa) tinggi, dan dijadikan sayuran serta olahan lain untuk konsumsi manusia (Kalay dkk 2019). Maka dari itu tanaman jagung sangat penting dalam menopang perekonomian sebagai komoditi nasional serta komoditi rumah tangga.

Jagung memerlukan cahaya matahari langsung untuk tumbuh dengan normal. Tempat dengan curah hujan 85-200mm perbulan, suhu udara 23-27 °C (ideal), dan pH tanah 5,6-7,5. Ini adalah kondisi ideal yang diperlukan proses perkecambahan dan perkembangan daun muda serta proses pengakaran dan pertunasan. Jenis tanah yang baik adalah tanah yang teraerasi dengan baik dan ketersediaan air tercukupi. Air yang cukup pada fase pertumbuhan awal, pembangunan, serta pengisian biji.

Secara khusus, dalam budidaya tanaman jagung manis sering mengalami kendala, salah satunya adalah rendahnya kesuburan tanah. Tanah di daerah beriklim tropis seperti Indonesia memiliki kesuburan yang rendah karena didominasi oleh lempeng kaolinitik (Savei, 2012).

Bioremediasi adalah proses pembersihan tanah dengan menggunakan mikroorganisme. Bioremediasi bertujuan untuk memecah atau mendegradasi zat pencemaran menjadi bahan yang tidak beracun (karbon dioksida dan air). Salah satu proses penyuburan tanah yang melibatkan peranan mikroorganisme adalah metode yang menggunakan media bahan organik dan pupuk hayati. Bioremediasi

merupakan aktivitas prosedural yang terorganisir dengan baik secara mikrobiologis yang diterapkan untuk memecah atau mengubah kontaminasi menjadi bentuk unsur atau senyawa yang less toxin dan antitoxin (Savei, 2012).

Penggunaan proses biodegradasi secara produktif untuk menghilangkan atau mendetoksifikasi polutan yang telah masuk ke lingkungan dan mengancam kesehatan masyarakat, biasanya karena kontaminasi tanah, air, atau sedimen disebut bioremediasi (Nurhidayah,2011). Hal ini dilanjutkan berdasarkan kemampuan mikroorganisme tertentu untuk mengubah, memodifikasi dan memanfaatkan polutan beracun untuk memperoleh energi dan produksi bioremediasi dalam prosesnya (Jain et al., 2011).

Secara umum bioremediasi dimaksudkan sebagai penggunaan mikroba untuk menyelesaikan masalah-masalah lingkungan atau untuk menghilangkan senyawa-senyawa yang tidak diinginkan dari tanah, lumpur atau permukaan air. Proses penghilangan senyawa ini mampu dilakukan dengan penambahan atau sintesa bahan organik dan pupuk hayati pada objek tanah. Selain mudah untuk didapatkan, juga tidak beresiko dalam kerusakan lingkungan (Nurhidayah,2011).

Bahan organik dan pupuk hayati merupakan salah satu komponan teknologi pertanian yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan komplementer terhadap teknologi pertanian lain untuk digunakan dalam program peningkatan produktivitas pertanian, penghemat biaya pupuk serta mendukung efektifitas penanganan masalah tanah objek tanam. Jika dilihat dari bahan, bahan organik dan pupuk hayati terbuat dari limbah dapur, molase, sumber mikroba penambat nitrogen, dan kecambah kacang hijau. Kemudian bahan organik dan pupuk hayati mampu

menyediakan unsur hara yang lengkap dan berkesinambungan karena mikroorganisme yang terkandung dalam bahan organik dan pupuk hayati dapat memproduksi senyawa kimia dan biologi pendukung kesuburan tanah secara otonom (Savei, 2012).

Melihat korelasi antara proses perkecambahan tanaman jagung pada jenis tanah tambang yang diberikan tindakan bioremediasi, maka di lakukan penelitian dengan tujuan untuk efektifitas kesuburan tanah bekas tambang yang dibioremediasi dengan bahan organik dan pupuk hayati.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, selanjutnya penulis merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Kandungan logam berat nikel pada tanah sebelum dan setelah perlakuan Bioremediasi?
2. Bagaimana perbedaan bahan organik dan pupuk hayati terbaik untuk bioremediasi pada tanah bekas tambang nikel?
3. Bagaimana kadar pH tanah untuk perkecambahan tanaman jagungn pada tanah bekas tambang nikel?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian yang didapatkan sebagai berikut:

1. Perbedaan kandungan logam berat nikel pada tanah sebelum dan setelah bioremdiasi.

2. Perbedaan bahan organik dan pupuk hayati terbaik untuk bioremediasi pada tanah bekas tambang nikel.
3. Perbedaan pH tanah untuk perkecambahan tanaman jagung pada tanah bekas tambang nikel.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkecambahan Tanaman Jagung

Perkecambahan adalah proses awal pertumbuhan individu baru pada tanaman yang diawali dengan munculnya radikel pada benih. Perkecambahan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air dalam media pertumbuhan. Air akan diabsorbsi dan digunakan untuk memacu enzim metabolisme perkecambahan (Agustrina, 2008).

Pada proses perkecambahan, embrio dalam biji yang semula berada pada kondisi dorman mengalami sejumlah perubahan fisiologis yang menyebabkan ia berkembang menjadi tumbuhan muda. Tumbuhan muda inilah yang dikenal sebagai kecambah (Nurhidayah R. 2011).

2.1.1 Tahapan perkecambahan pada jagung

Menurut (Nurhidayah R. 2011), adapun tahapan perkecambahan pada jagung adalah sebagai berikut:

1) Penyerapan Air (imbibisi)

   Biji jagung menyerap air dari lingkuga sekitarnya, menyebabkan biji membengkak. Proses ini mengaktifkan enzim-enzim di dalam biji.

2) Aktivasi Enzim

   Enzim-enzim yang diaktifkan akan mulai memecah cadangan makanan di dalam endosperma (bagian biji yang mengandaung nutrisi) menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh embrio untuk tumbuh.

3) Pertumbuhan Embrio

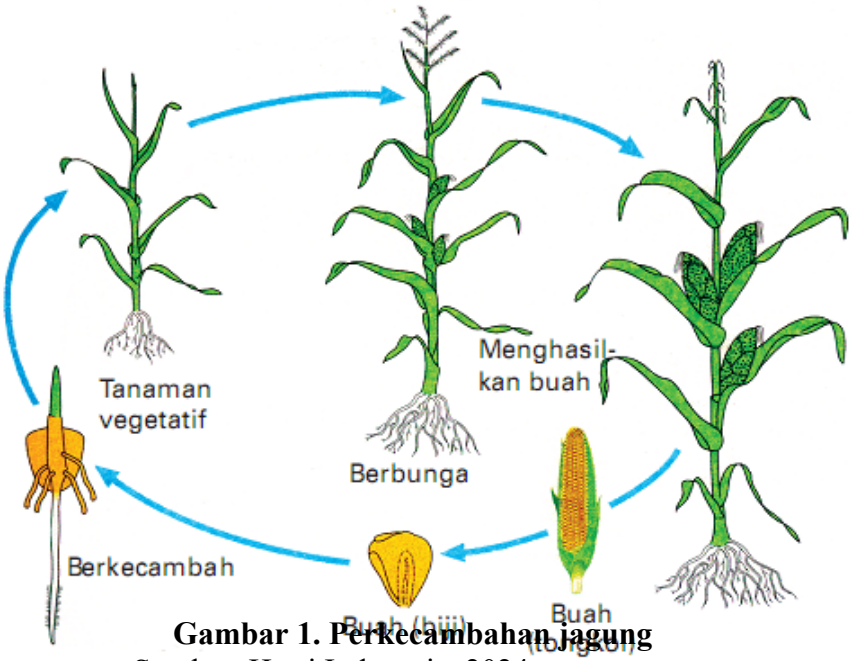
   Embrio dalam biji mulai tumbuh, dimulai dengan keluarnya radikula (akar embrionik) dari biji. Radikula tumbuh ke bawah mencari air dan nutrisi dari tanah.

4) Pertumbuhan Plumula

Setelah radikula muncul, plumula (tunas embrionik) mulai tumbuh ke atas menuju permukaan tanah. Plumula akan menjadi daun pertama tanaman jagung.

5) Tanaman Muda

Setelah plumula mencapai permukaan tanah, daun-dain pertama mulai terbuka, dan proses fotosintetis dimulai. Pada tahap ini, tanaman muda bergantung pada fotosintesis untuk mendapatkan energi, dan pertumbuhannya akan berlanjut.



Gambar 1. Perkecambahan jagung
Sumber. Horti Indonesia. 2024

2.1.2 Tipe perkecambahan pada jagung

Tipe perkecambahan pada jagung adalah hypogeal. Hipogeal merupakan perkecambahan yang kotiledonnya tetap terpendam di bawah tanah. Contoh perkecambahan hypogeal bisa dilihat pada tumbuhan monokotil seperti jagung dan kelapa (Rahman A. 2022).

2.2. Tanah Bekas Tambang Nikel

2.2.1 Nikel

Nikel termasuk unsur kimia metalik dalam table periodic yang memiliki symbol Ni dan nomor atom 28. Nikel adalah logam berwarna putih keperakan dengan sedikit semburat emas. Nikel termasuk dalam golongan logam transisi yang memiliki sifat keras namun memungkinkan untuk diebntuk sesuai kebutuhan penggunaan (Hardjowigeno, S. 2020).

Nikel juga tergolong dalam grup logam besi-kobalt, memiliki aktivitas kimia yang signifikan dan reaksi yang termasuk lambat dengan udara dalam kondisi normal. Hal ini disebabkan karena lapisan oksidasi terbentuk di permukaan nikel dan mencegah korosi lebih lanjut (pasivasi). Nikel pertama kali diklasifikasikan sebagai unsur kimia pada tahun 1751 oleh Axel Fredrik Constredt, yang pada awalnya diasumsikan sebagai mineral tembaga di tambang kobalt, di Los, Haisingland, Swedia (Havlin, J.L. 2014).

2.2.2 Kondisi Tanah Bekas Tambang Nikel

Nikel merupakan logam yang berperan penting dalam berbagai aplikasi industri, terutama dalam produksi *stainless steel*, baterai dan panduam logam lainnya. proses penambangan nikel melibatkan ekstraksi bijih nikel dari tanah, yang kemudian diperoleh logam nikel yang murni. Tambng nikel ditemukan di beberapa negara, termasuk Indonesia yang memilik cadangan nikel yang terbesar (Havlin, J.L. 2021).

Menurut United States Geological Survey menyebutkan Indonesia mempunyai cadangan nikel sebesar 21 juta ton, sedangkan Badan Geologi menyebutkan bahwa Indonesia mencapai 11,7 ton. Kebanyakan kegiatan pertambangan dilakukan dengan penambangan terbuka (*open pit mining*).

Dalam penambangan nikel terdapat proses pengupasan tubuh tanah sampai kedalaman puluhan meter untuk mendapatkan bahan yang diinginkan. Kegiatan pengupasan ini menyebabkan tercampurnya bahan batuan *overburden* dengan tanah pucuk (*top soil*) menghasilkan hamparan tanah yang mempunytai batuan yang memiliki kandungan bahan organik yang sangat rendah, retensi air dan unsur hara yang rendah, kandungan unsur yang bersifar toksik tinggi, dan tidak berstruktur (Kalay, Z. 2019).

Dalam Kumar dan Pandey, 2013 (Subowog., 2011), sistem penambangan terbuka yang berada di permukaan tanah banyak mengubah bentang alam dan keseimbangan ekosistem permukaan tanah, menurunkan produktifitas tanah dan mutu lingkungan.

Perubahan lingkungan pasca penambangan menyebabkan terjadinya perubahan bentang lahan dan juga terjadi perubahan kualitas tanah. Tanah bagian atas digantikan tanah dari bagian lapisan bawah yang kurang subur, sehingga tanah-tanah tersebut memiliki sifat fisik terutama tekstur yang kurang sesuai untuk pertanaman dan juga minim bahan organik (Mashud dan Manaroinsong, 2014).

Selain perubahan fisik dan kimia ternyata perubahan lingkungan terhadap populasi mikroba dan organisme penyubur tanah serta merubah iklim mikro menjadi kurang baik untuk kelangsungan hidup organisme (Mashud, M. 2014).

Metode yang paling umum yang bisa digunakan sebagai tindakan penyelamatan lahan bekas tambang nikel adalah dengan melakukan reklamasi tambang nikel. Reklamasi ini termasuk penutupan lubang tambang, penyuburan kembali, pemanfaatan kembali, dan juga tindakan pertanian seperti bioremedesasi bahan organik dan pupuk hayati. Metode ini termasuk ampuh apabila dilakukan sesuai dengan regulasi yang telah ditetapkan (Marschner, P. 2021).

2.3 Bioremediasi Bahan organik dan pupuk hayati

2.3.1 Bioremediasi

Bioremediasi adalah suatu proses penggunaan beragam jenis organisme hidup, seperti bakteri, jamur, dan tanaman, yang dipergunakan untuk dapat membersihkan atau mengurangi pencemaran dalam lingkungan. Organisme hidup yang digunakan dapat menguraikan atau mendekomposisi beragam jenis senyawa kimia berbahaya yang terdapat di beragam tempat seperti di dalam air, tanah, atau udara, sehingga dapat menciptakan lingkungan yang lebih sehat dan juga aman bagi manusia dan makhluk hidup lain di sekitarnya (Fauziyah. 2021).

Dalam waktu yang cukup lama, penelitian dan pengembangan bioremediasi terus berlanjut. Teknologi bioremediasi yang lebih baru dan lebih efektif terus dikembangkan. Seperti saat ini, bioremediasi menjadi metode yang paling umum digunakan di seluruh dunia untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminas (Nurulita, T. 2022).

2.4 Biochar

Biochar adalah bahan padat karya karbon hasil konversi dari limbah organik (biomas pertanian) melalui pembakaran tidak sempurna dan suplai oksigen terbatas (pyrolysis) (Quintella. 2019).

Pembakaran tidak sempurna dapat dilakukan dengan alkat pembakaran atau pirolisator dengan suhu 250-350C, selama 1-3jam, tergantung pada jenis biomas dan alat pembakaran yang digunakan. Biochar sangat bermanfaat bagi pertanian terutama perbaikan kualitas lahan (sifat fisik kimia, biologi tanah) (Rahman. 2022).

2.5 Pupuk Kompos

Pupuk kompos adalah salah satu jenis pupuk organik yang dikenal luas oleh masyarakat yang aktif pada kegiatan pertanian. Pupuk kompos berasal dari penguraian ssampah seperti dedaunan (Rahmi. 2023).

Pengomposan sebenarnya dapat terjadi dengan sendirinya tanpa adanya campur tangan manusia. Namun ketika ada tindakan manusia dengan menambahkan mikroorganisme pengurai, pengomposan akan menjadi lebih cepat (Savei, L. 2012).

2.6 Asam Humat

Asam Humat adalah salah satu dari tiga bahan penyusun zat humat yang merupakan komponen pembentuk humus. Humus itu sendiri adalah tanah yang memiliki tingkat kesuburan tinggi yang terbentuk dari pelapukan bahan organik, seperti daun dan batang pohon. Asam humat dipperoleh melaliu proses ekstraksi humus (Sutanto, R. 2020).

Asam humat dapat memperbaiki sifat kimia, fisik, dan biologi tanah. Sehingga pengaplikasian asam humat dapat memperbaiki kondisi tanah yang sudah terdegradassi dan meminimalisir kemungkinan kehilangan nutrisi dari pupuk organik akibat pencucian atau penguapan (Sun, H. 2022).

2.7 PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)

PGPR adalah kelompok bakteri menguntungkan yang mengklonisasi rizosfir (lapisan tanah tipis antara 1-2 mm di sekitar zona perakaran). aktivitas PGPR berpengaruh secara positif bagi pertumbuhan tanaman, baik secara lansung maupun secara tidak lansung (Sudirman, A. 2021).

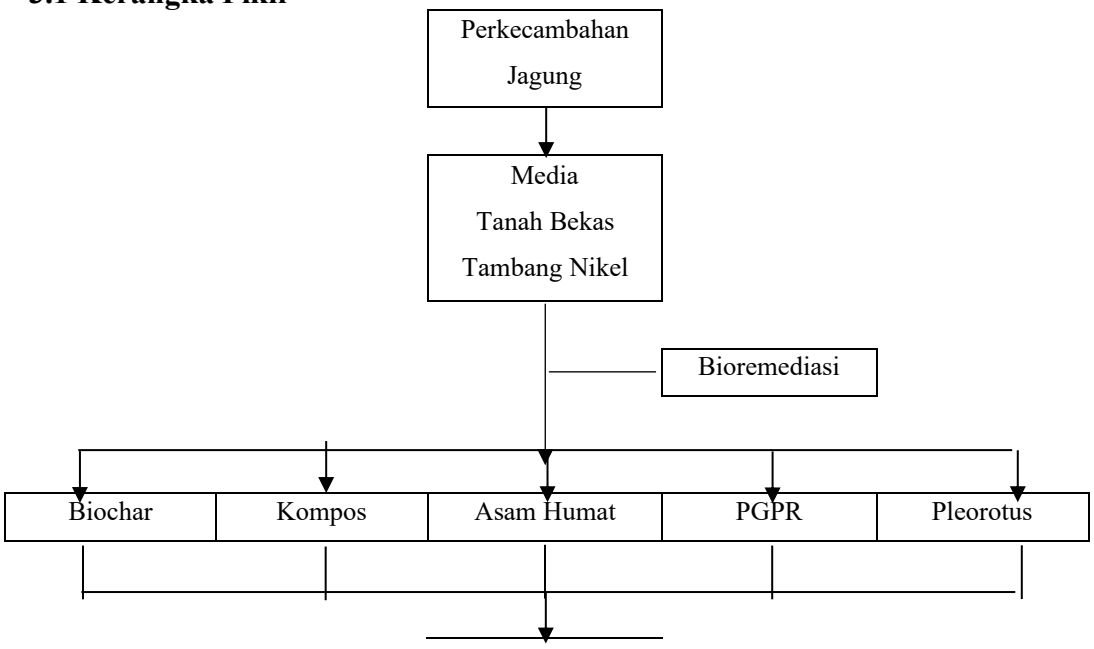
Berdasarkan defenisi, raziobakteri adalah kelompok bakteri yang memiliki kemampuan mengikat atau memfiksasi nitrogen bebas dari alam. Nitrogen bebas tersebut selanjutnya diubah

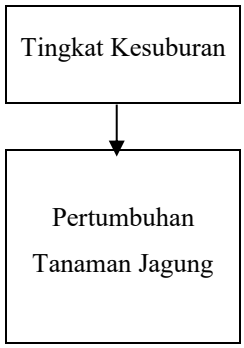
menjadi ammonia kemudian disalurkan ke tanaman. Berbagai jenis bakteri telah diidentifikasi sebagai PGPR (Scoma, A. 2022).

Pengaruh lansung PGPR adalah menyediakan dan memobilisasi penyerapan berbagai unsur hara dalam tanah. Selain itu juga berperan dalam sintesis dan pengontrolan kontsentrasi berbagai hormone pemacu pertumbuhan tanaman. Secara tidak lansung PGPR berperan melindungi tanaman dengan cara menghambat aktifitas pathogen. Selain itu juga dapat memperbaiki struktur tanah serta mengikat logam berat yang terdapat di dalam tanah (Muness & Mulugeta 2014).

BAB III KERANGKA PIKIR DAN HIPOTESIS PENELITIAN

3.1 Kerangka Pikir





Gambar 2. Kerangka Pikir Penelitian

3.2 Hipotesis

Hipotesis penelitian ini adalah:

1. Terdapat perbedaan kandungan logam berat nikel pada tanah sebelum dan setelah perlakuan bioremediasi
2. Terdapat perbedaan bahan organik dan pupuk hayati terbaik untuk bioremediasi pada tanah bekas tambang nikel
3. Terdapat perbedaan perbedaan pH tanah unuk perkecambahan tanaman jagung pada tanah bekas tambang nikel

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Screen House Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Pare Pare, pada September sampai Oktober 2025dan untuk pengambilan sample tanah bekas tambang nikel di lakukan di 2 lokasi yaitu Morowali dan Sorowako. Analisis tanah dilakukan di laboratorium ilmu tanah Unhas.

4.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah toples kaca 250 Ml, ember, Ruang Kedap Udara, Timbangan, Alat Tulis, Perekam, Wadah Plastik, Karet, Pinset, Gunting dan Air.

Bahan yang diperlukan dalam penelitian ini ialah benih Jagung, Tanah Bekas Tambang Nikel, Biochar, Pupuk Kompos, PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) , pleorotus dan Asam Humat.

4.3 Subjek Penelitian

Simbol	Keterangan	Jumlah/Dosis
L1	Tanah sub soil (kotrol)	187.5 gr
L2	Tanah Bekas Tambang	187.5 gr
L3	Tanah Bakas Tambang	187.5 gr
P1	Biochar	11-14 gr
P2	Pupuk Kompos	11 gr
P3	PGPR	30 ml
P4	Asam Humat	18.05 gr
P5	Pleorotus	5 gr

4.4 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dua faktorial, faktor pertama yaitu jenis tanah dari 2 lokasi yaitu:

L1 = Top Soil + Biochar

L2 = Top Soil + Kompos

L3 = Morowali + Biochar

L4 = Morowali + Kompos

L5 = Sorowako + Biochar

L6 = Sorowako + Kompos

Faktor kedua adalah bahan organik dan pupuk hayati:

P1 = PGPR

P2 = Asam Humat

P3 = Pleorotus

Sehingga terdapat 18 kombinasi perlakuan, tiap perlakuan diulang sebanyak 3 kali, sehingga terdapat 54 unit percobaan. Tiap unit terdiri dari 2 aqua gelas, sehingga terdapat 108 unit pengamatan

4.5 Prosedur Penelitian

4.5.1 Persiapan Bibit

Persiapan bibit dilakukan dengan perendaman benih jagung yang akan dijadikan sampel percobaan untuk menentukan kualiatas L1, L2, L3, L4, L5 dan L6 untuk bioremediasi menggunakan P1, P2, dan P3.

4.5.2 Pembuatan Media Bioremediasi

Pembuatan media bioremediasi biji jagung dilakukan dengan menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan pada setiap tahapan. Media utama yang digunakan adalah biji jagung yang berfungsi sebagai bahan dasar dalam proses bioremediasi. Selain itu, digunakan tanah bekas tambang sebagai media pembibitan untuk mendukung pertumbuhan jagung sekaligus menjadi objek utama dalam proses remediasi. Agar proses bioremediasi berjalan optimal, ditambahkan bahan organik dan pupuk hayati yang berperan sebagai agen pendukung untuk memperbaiki sifat tanah, meningkatkan ketersediaan hara, serta membantu mikroorganisme dalam menguraikan senyawa beracun yang terdapat pada tanah bekas tambang

4.6 Parameter Pengamatan

Parameter pengamatan antara lain yaitu:

1. Kandungan N, P, K sebelum dan sesudah perlakuan bioremidiasi,

a. Pengambilan Sampel tanah: Pengambilan sampel sebelum dan sesudah bioremediasi untuk mendapatkan data yang akurat. pengambilan beberapa sampel tanah dari kedalaman 20 cm di lokasi yang terkontaminasi.

b. **Pengukuran Kandungan Nitrogen (N),** Pengukuran kandungan nitrogen dapat dilakukan menggunakan metode yang tepat sesuai bentuk nitrogen yang diinginkan (Total Nitrogen, Nitrogen Amonium, Nitrat, dll) dengan menggunakan **Metode Kjeldahl (untuk Total Nitrogen), Pengukuran Kandungan Fosfor (P),** Fosfor biasanya diukur sebagai **Fosfat ($PO4^{3-}$)** yang merupakan bentuk paling umum di lingkungan. **Pengukuran Kandungan Kalium (K),** Kalium dalam tanah biasanya diukur sebagai kalium yang dapat dipertukarkan, menggunakan metode ekstraksi kimia.

2. Kandungan logam berat Ni, Hg, Pb sebelum dan setelah perlakuan bioremidiasi
3. Panjang akar (cm) tanaman jagung di umur 10 hari setelah tanam,
4. Laju parameter perkecambahan
   a. **Indeks Kecepatan Perkecambahan (Germination Speed Index, GSI),** Indeks Kecepatan Perkecambahan mengukur seberapa cepat benih berkecambah selama periode pengamatan. Semakin tinggi nilai GSI, semakin cepat benih berkecambah. Menurut Silva J.A. et al. (2023), adapun rumus indeks kecepatan perkecambahan

Rumus GSI:

$$\mathrm{GSI} = \frac{G_1}{T_1} + \frac{G_2}{T_2} + \ldots + \frac{G_n}{T_n}$$

Dimana:

- GnG_nGn = Jumlah benih yang berkecambah pada hari ke-n
- TnT_nTn = Jumlah hari sejak penanaman (hari ke-n)

b. Waktu Rata-rata untuk Perkecambahan (Mean Germination Time, MGT), MGT menghitung waktu rata-rata yang dibutuhkan oleh benih untuk berkecambah. Semakin rendah nilai MGT, semakin cepat perkecambahan terjadi. Menurut Alem, S. et al (2024), adapun rumus waktu rata-rata untuk perkecambahan yaitu

Rumus MGT:

$$\text{MGT} = \frac{\sum(n \times t)}{\sum n}$$

Dimana:

- nnn = Jumlah benih yang berkecambah pada hari ke-n
- ttt = Jumlah hari sejak penanaman

c. **Persentase Perkecambahan (Germination Percentage, GP),** Persentase perkecambahan mengukur jumlah benih yang berhasil berkecambah dibandingkan total benih yang ditanam, biasanya dinyatakan dalam persen. Menurut Copeland, L.O & McDonald, M.B (2001), adapun rumus persentae perkecambahan yaitu

Rumus Persentase Perkecambahan:

$$\text{GP} = \frac{\text{Jumlah benih yang berkecambah}}{\text{Jumlah total benih}} \times 100\%$$

4.7 Analisis dan Interpretasi Data

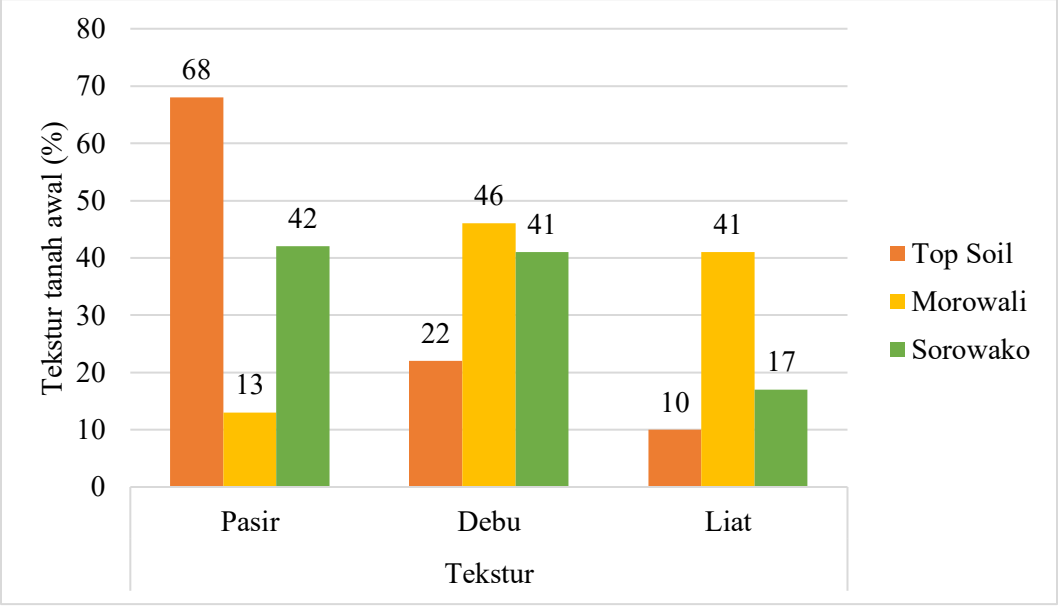
Data yang telah dikumpulkan merupakan hasil pengukur tingkat kesuburan tanah bekas tambang dengan media bahan organik dan pupuk hayati dengan melakukan bioremediasi terhadap perkecambahan jagung yang selanjutnya dilakukan uji ANOVA (Analysis of Variance) *two ways* (Tran et al., 2024), untuk mendapatkan tingkat kesuburan tanah dan dosis pupuk yang akan di gunakan pada masing-masing sampel tanah bekas tambang yang akan digunakan.

BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Tekstur Tanah (%)

5.1.1 Tekstur Tanah Awal

Karakteristik tekstur tanah berperan penting dalam menentukan kemampuan tanah dalam menyimpan air, sirkulasi udara, serta ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Gambar di bawah ini menunjukkan perbandingan tekstur tanah awal dari tiga lokasi berbeda, yaitu Top Soil, Morowali, dan Sorowako.



Gambar 3. Komposisi Fraksi Tanah Sebelum Perlakuan

Gambar 3. Menunjukkan perbandingan tekstur tanah awal dari tiga lokasi berbeda, yaitu Top Soil, Morowali, dan Sorowako, berdasarkan tiga fraksi utama penyusun tanah: pasir, debu, dan liat. Dari

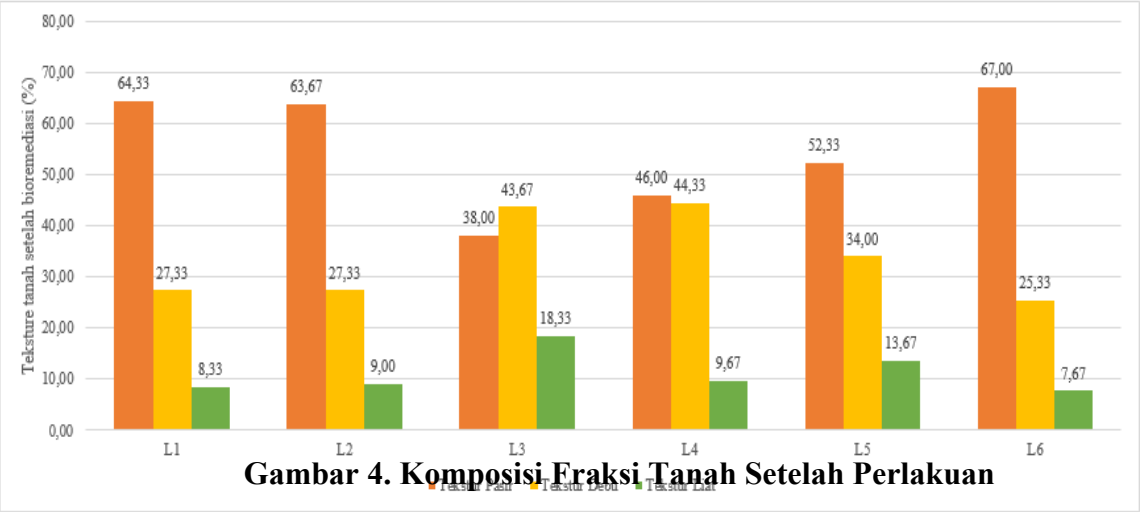
grafik tersebut terlihat bahwa tekstur tanah sangat bervariasi antar lokasi. Top Soil didominasi oleh fraksi pasir sebesar 68%, sementara fraksi debu dan liat masing-masing hanya 22% dan 10%. Hal ini menunjukkan bahwa tanah pada lapisan atas (Top Soil) memiliki tekstur yang cenderung kasar. Tanah berpasir umumnya memiliki pori-pori besar, daya drainase tinggi, namun kapasitas menahan air dan unsur hara relatif rendah. Oleh karena itu, tanah jenis ini memerlukan tambahan bahan organik agar kesuburannya tetap terjaga (Subardja et al., 2021).

Sebaliknya, tanah dari Morowali menunjukkan dominasi fraksi debu dan liat masing-masing sebesar 46% dan 41%, dengan kandungan pasir hanya 13%. Kombinasi ini menunjukkan bahwa tanah Morowali memiliki tekstur halus hingga berat, yang biasanya mampu menahan air dan unsur hara dalam jumlah besar. Namun, tanah liat sering kali memiliki aerasi yang buruk dan cenderung mudah memadat, sehingga memerlukan pengolahan fisik intensif agar pertumbuhan akar tanaman tidak terganggu (Hardjowigeno, 2020). Di sisi lain, tanah dari Sorowako menunjukkan komposisi fraksi yang lebih seimbang, yaitu pasir 42%, debu 41%, dan liat 17%. Komposisi ini mencerminkan tekstur tanah yang mendekati lempung berpasir atau lempung berdebu, yang dianggap ideal untuk budidaya pertanian karena mampu mengalirkan air dengan baik sekaligus menyimpan kelembaban dan unsur hara dalam jumlah sedang (Rahmi et al., 2023).

Perbedaan tekstur tanah pada ketiga lokasi tersebut memberikan gambaran penting terkait karakteristik fisik tanah yang akan memengaruhi strategi pengelolaan lahan. Top Soil cocok untuk tanaman tahan kekeringan, namun memerlukan pemupukan organik yang rutin. Morowali memiliki potensi kesuburan tinggi, namun butuh pengolahan tanah untuk mencegah pemadatan. Sedangkan Sorowako memiliki sifat fisik tanah yang relatif seimbang, sehingga menjadi lokasi yang paling potensial untuk pengembangan pertanian dengan pengelolaan yang efisien.

5.1.2 Tekstur Tanah setelah Bioremediasi (%)

Bioremediasi merupakan salah satu upaya rehabilitasi tanah tercemar atau terganggu melalui pemanfaatan organisme hidup, seperti mikroba, untuk memperbaiki kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah. Salah satu indikator keberhasilan bioremediasi adalah adanya perubahan atau perbaikan pada tekstur tanah, terutama dalam hal distribusi fraksi pasir, debu, dan liat. Tekstur tanah yang seimbang setelah proses bioremediasi dapat meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan unsur hara, serta mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Gambar berikut memperlihatkan perubahan komposisi tekstur tanah pada beberapa lokasi setelah dilakukan proses bioremediasi.



Gambar 4. Komposisi Fraksi Tanah Setelah Perlakuan

Gambar 4. Menunjukkan perbandingan tekstur tanah setelah proses bioremediasi pada enam lokasi berbeda (L1 hingga L6), yang meliputi tiga fraksi utama penyusun tanah: pasir, debu, dan liat. Berdasarkan data yang ditampilkan, terlihat bahwa fraksi pasir tetap mendominasi pada sebagian besar lokasi, dengan nilai tertinggi terdapat pada L6 sebesar 67%, disusul L1 (64,33%) dan L2 (63,67%). Meskipun dominasi pasir masih tinggi, terjadi peningkatan komposisi fraksi debu dan liat pada beberapa lokasi, terutama di L3 dan L4. L3 menunjukkan distribusi fraksi yang lebih seimbang, dengan pasir 38%, debu 43,67%, dan liat 18,33%, sedangkan L4 memiliki

komposisi pasir 46%, debu 44,33%, dan liat 9,67%. Komposisi ini mengindikasikan adanya perbaikan tekstur menuju tanah lempung berpasir atau berdebu yang cenderung lebih baik dalam menyimpan air dan unsur hara dibanding tanah berpasir murni.

Peningkatan fraksi debu dan liat ini mencerminkan keberhasilan sebagian proses bioremediasi dalam memperbaiki struktur dan sifat fisik tanah. Penambahan bahan organik dan aktivitas mikroorganisme selama bioremediasi dapat membantu membentuk agregat tanah dan meningkatkan stabilitas struktur tanah, sehingga partikel halus seperti debu dan liat menjadi lebih dominan (Fauziyah et al., 2021). Hal ini penting karena tanah dengan tekstur seimbang antara pasir, debu, dan liat memiliki kapasitas kelembaban yang lebih baik serta daya ikat unsur hara yang optimal, yang mendukung pertumbuhan tanaman (Wijayanti & Permana, 2023). Namun, pada lokasi seperti L1, L2, dan L6, kandungan liat masih sangat rendah (<10%), menandakan bahwa proses bioremediasi belum sepenuhnya efektif dalam membentuk tekstur tanah ideal di area tersebut.

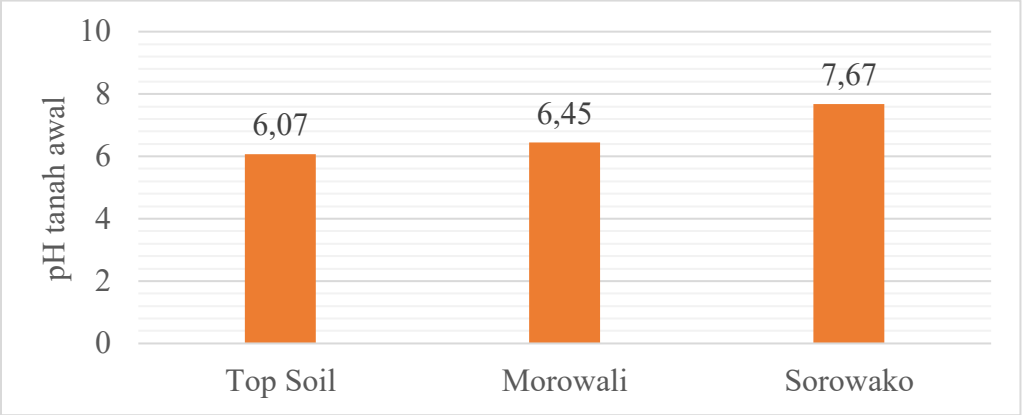
Peningkatan fraksi debu dan liat di beberapa titik menjadi indikasi positif bahwa bioremediasi dapat memperbaiki kualitas tekstur tanah. Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Nurulita et al. (2022), yang menyatakan bahwa bioremediasi dengan penggunaan mikroorganisme pengurai dan bahan organik mampu memperbaiki tekstur dan kesuburan tanah secara bertahap

5.2 pH Tanah

5.2.1 pH Tanah Awal

pH tanah merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kesuburan tanah, karena mempengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman serta aktivitas mikroorganisme dalam tanah. Pengukuran pH tanah awal dilakukan untuk mengetahui kondisi awal tanah sebelum perlakuan atau pengolahan lebih lanjut.

Pengambilan sampel tanah dilakukan secara representatif di lokasi penelitian, kemudian diukur menggunakan metode elektrometri dengan pH meter. Hasil pengukuran pH tanah awal ditampilkan pada gambar berikut:



Gambar 5. Perbandinga pH tanah awal

Gambar 5. Menunjukkan pengukuran pH tanah awal dilakukan untuk mengetahui tingkat keasaman tanah sebelum perlakuan atau pengolahan lebih lanjut. Nilai pH tanah awal menunjukkan bahwa tanah Top Soil memiliki pH sebesar 6,07, tanah Morowali sebesar 6,45, dan tanah Sorowako sebesar 7,67. Perbedaan pH ini menggambarkan variasi tingkat keasaman tanah yang dapat memengaruhi ketersediaan unsur hara serta aktivitas mikroba di masing-masing jenis tanah.

Nilai pH tanah awal menunjukkan variasi antara agak asam hingga alkalis. Tanah Top Soil memiliki pH sebesar 6,07, Morowali 6,45, sedangkan Sorowako mencapai 7,67. Kisaran pH 6–7,5 umumnya merupakan kondisi optimal bagi pertumbuhan tanaman karena mendukung ketersediaan unsur hara dan aktivitas mikroba tanah (Fao. 2003). Pada tanah dengan pH lebih tinggi, seperti Sorowako (7,67), ketersediaan fosfor (P) serta mikronutrien seperti Fe, Mn, dan Zn cenderung menurun akibat proses presipitasi maupun adsorpsi, sehingga berpotensi menimbulkan defisiensi hara pada tanaman (Chen et al., 2024). Sebaliknya, tanah dengan pH agak asam seperti Top Soil

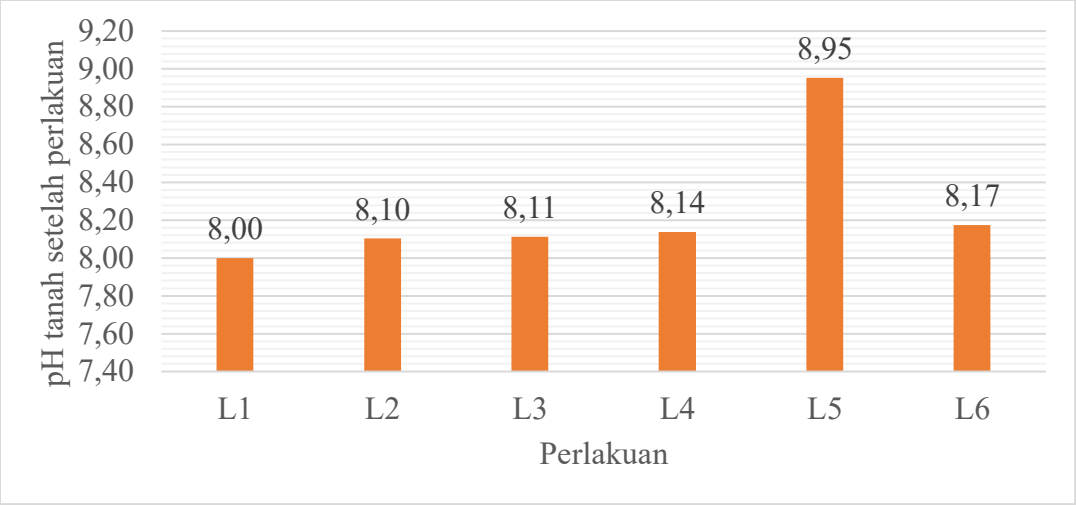
dan Morowali masih berada pada kisaran ideal, meskipun penurunan pH lebih lanjut dapat meningkatkan kelarutan logam berat seperti Ni, Cd, atau Pb yang berbahaya bagi tanaman (Wang et al., 2023).

Tanah laterit yang kaya akan logam, seperti Morowali dan Sorowako, pH berperan penting dalam menentukan mobilitas nikel (Ni). Pada kondisi asam, kelarutan Ni meningkat sehingga lebih mudah diserap tanaman, sedangkan peningkatan pH melalui pengapuran dapat menekan ketersediaan logam tersebut (Li et al., 2024). Pengelolaan pH secara jangka panjang sangat menentukan stabilitas hara dan logam dalam tanah, sehingga strategi ameliorasi seperti pengapuran atau aplikasi bahan organik dapat menjadi solusi untuk mempertahankan pH tanah dalam kisaran optimal (Zhang et al., 2022).

5.2.2 pH Tanah setelah Perlakuan

Setelah dilakukan proses bioremediasi, pengukuran pH tanah kembali dilakukan untuk mengevaluasi perubahan tingkat keasaman tanah akibat perlakuan tersebut. Bioremediasi merupakan salah satu pendekatan ramah lingkungan yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme dalam memperbaiki kondisi tanah yang tercemar, termasuk memperbaiki sifat kimia tanah seperti pH. Perubahan pH tanah setelah bioremediasi penting untuk dianalisis, karena dapat memberikan gambaran sejauh mana aktivitas mikroba dan proses biologis lainnya mampu menstabilkan atau meningkatkan kualitas tanah, khususnya dalam konteks ketersediaan unsur hara dan potensi pertumbuhan tanaman.

Nilai pH tanah yang meningkat atau mendekati kondisi netral setelah bioremediasi menunjukkan perbaikan kondisi tanah, sedangkan penurunan pH atau tetap dalam kondisi asam dapat menjadi indikator bahwa proses bioremediasi belum berlangsung optimal. Hasil pengukuran pH tanah setelah proses bioremediasi disajikan pada gambar berikut:



Gambar 6. Perbandingan pH tanah setelah perlakuan

Gambar 6. Menunjukkan bahwa pH tanah setelah perlakuan berada pada kisaran 7,90 hingga 9,00. Nilai pH terendah terdapat pada perlakuan L1 yaitu sebesar 7,90, sedangkan nilai pH tertinggi diperoleh pada perlakuan L5 sebesar 9,00. Perlakuan L2, L3, L4, dan L6 menunjukkan nilai pH relatif serupa dengan kisaran 8,10–8,20. Data ini memperlihatkan bahwa perlakuan L5 mampu meningkatkan pH tanah lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya, sementara perlakuan L1 menunjukkan pH paling rendah.

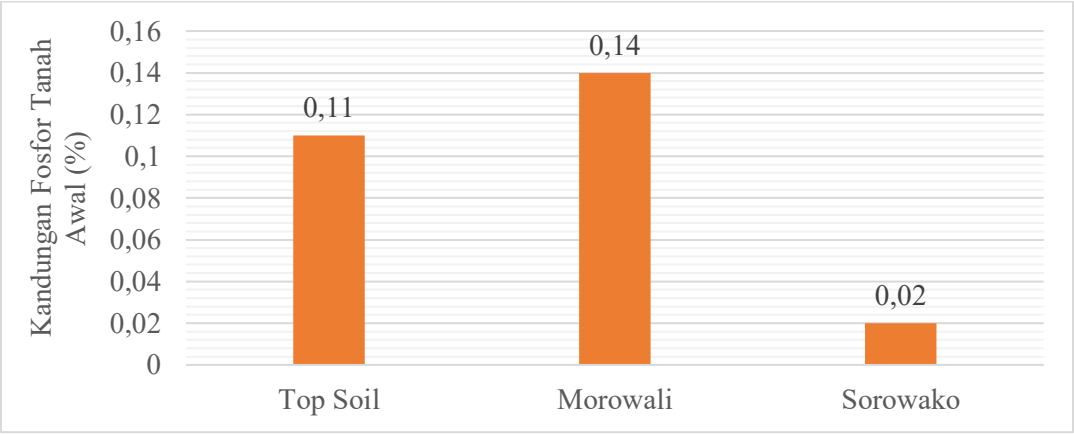
pH tanah setelah perlakuan menunjukkan kisaran 7,90–9,00. Nilai terendah terdapat pada perlakuan L1 dengan pH 7,90, sedangkan nilai tertinggi ditunjukkan oleh perlakuan L5 dengan pH mencapai 9,00. Sementara itu, perlakuan L2, L3, L4, dan L6 relatif stabil pada kisaran 8,10–8,20. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan L5 memberikan pengaruh paling besar dalam meningkatkan pH tanah dibandingkan perlakuan lain. Peningkatan pH hingga mendekati 9,00 menandakan terjadinya perubahan sifat kimia tanah menuju kondisi alkalis, yang berimplikasi pada penurunan kelarutan beberapa unsur hara esensial, terutama fosfor (P), besi (Fe), mangan (Mn), dan seng (Zn) (Chen et al., 2024).

Dalam konteks kesuburan tanah, pH optimal untuk sebagian besar tanaman berkisar antara 6,0–7,5, karena pada rentang ini unsur hara makro dan mikro tersedia dalam jumlah yang seimbang (FAO, 2023). Tanah dengan pH lebih tinggi dari 8,0 cenderung mengalami fiksasi fosfat dan defisiensi mikronutrien, sehingga meskipun reaksi tanah menjadi lebih basa, kondisi ini belum tentu menguntungkan untuk pertumbuhan tanaman (Zhang et al., 2022). Peningkatan pH juga dapat menurunkan mobilitas dan ketersediaan logam berat toksik seperti nikel (Ni), kadmium (Cd), dan timbal (Pb), yang biasanya lebih mudah terlarut pada kondisi masam (Li et al., 2024).

5.3 Kandungan Fosfor (P) (%)

5.3.1 Kandungan Fosfor (P) Tanah Awal

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara makro esensial bagi tanaman, berperan penting dalam proses fotosintesis, pembentukan energi (ATP), dan perkembangan akar. Kandungan P dalam tanah sangat dipengaruhi oleh pH tanah, tekstur, bahan organik, serta aktivitas mikroorganisme. Analisis kandungan P tanah awal dilakukan untuk mengetahui status awal ketersediaan fosfor sebelum perlakuan bioremediasi. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menilai efektivitas perlakuan yang dilakukan dalam memperbaiki kualitas tanah. Data kandungan P tanah awal ditampilkan pada gambar berikut:



Gambar 7. Perbandingan kandungan fosfor tanah awal

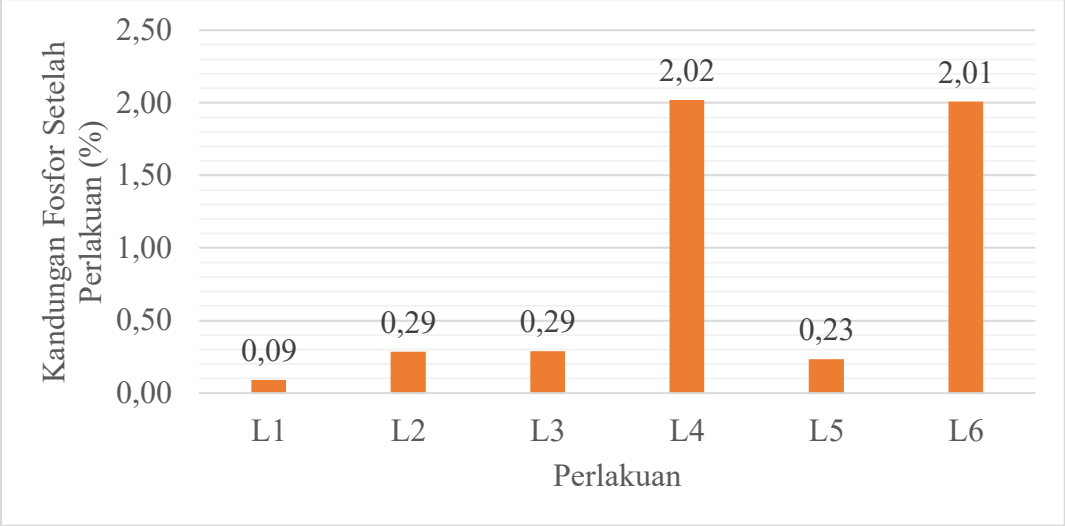
Gambar 7. Menunjukkan kandungan P2O5 pada tanah awal dari tiga sampel yang berbeda, diperoleh nilai yang bervariasi yaitu Top Soil sebesar 0,11%, Morowali sebesar 0,14%, dan Sorowako sebesar 0,02%. Kandungan P2O5 ini menunjukkan variasi tingkat kesuburan tanah di masing-masing lokasi. Morowali memiliki kandungan P2O5 tertinggi, yang mengindikasikan potensi kesuburan tanah yang lebih baik dibandingkan dengan Top Soil dan Sorowako. Sebaliknya, Sorowako memiliki kandungan P2O5 yang sangat rendah, yang dapat menunjukkan bahwa tanah di daerah tersebut kurang subur dan mungkin memerlukan pemupukan tambahan untuk menunjang pertumbuhan tanaman.

Kandungan fosfat (P2O5) merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kesuburan tanah karena fosfat berperan dalam proses metabolisme tanaman, pembentukan akar, dan pembentukan bunga serta buah (Havlin et al., 2014). Nilai kandungan fosfat yang rendah seperti pada tanah Sorowako dapat menghambat proses fisiologis tersebut sehingga berpotensi menurunkan hasil produksi tanaman. Oleh karena itu, pengelolaan tanah yang tepat seperti pemupukan fosfat menjadi sangat penting untuk memastikan ketersediaan nutrisi yang optimal bagi tanaman (Brady & Weil, 2016).

5.3.2 Kandungan Fosfor (P) Tanah Setelah Perlakuan

Setelah proses bioremediasi, dilakukan pengukuran ulang terhadap kandungan fosfor (P) tanah untuk mengetahui sejauh mana perlakuan yang diberikan mampu meningkatkan atau menstabilkan ketersediaan unsur tersebut. Proses bioremediasi yang melibatkan mikroorganisme dan bahan organik dapat meningkatkan mineralisasi P dan mengurangi fiksasi oleh Al atau Fe pada tanah asam. Evaluasi kandungan P pasca-bioremidiasi memberikan informasi penting tentang

efektivitas perlakuan dalam memperbaiki status hara tanah. Hasil pengukuran kandungan P setelah bioremediasi disajikan pada gambar berikut:



Gambar 8. Perbandingan kandungan fosfor setelah perlakuan

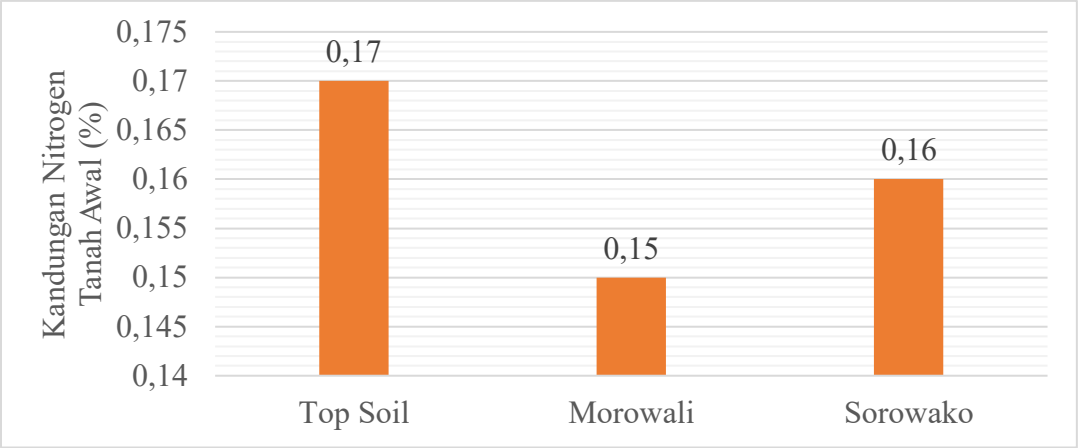
Gambar 8. Menunjukkan kandungan P2O5 setelah proses bioremediasi pada enam sampel tanah, terlihat adanya peningkatan kandungan fosfat yang signifikan pada beberapa sampel, khususnya L4 dan L6 dengan nilai masing-masing 2,02% dan 2,01%. Sampel L2 dan L3 juga menunjukkan peningkatan yang cukup baik yaitu 0,29%, dibandingkan dengan L1 dan L5 yang relatif rendah yakni 0,09% dan 0,23%. Peningkatan kandungan P2O5 ini mengindikasikan bahwa proses bioremediasi mampu memperbaiki kualitas dan kesuburan tanah dengan meningkatkan ketersediaan nutrisi fosfat yang esensial untuk pertumbuhan tanaman.

Proses bioremediasi memanfaatkan mikroorganisme yang dapat menguraikan bahan organik serta meningkatkan ketersediaan unsur hara seperti fosfat di dalam tanah (Singh et al., 2019). Mikroorganisme tersebut dapat membantu mengubah fosfat yang tidak tersedia menjadi bentuk yang mudah diserap oleh tanaman, sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan dan kesuburan tanah (Chen et al., 2016).

5.4 Kandungan Nitrogen (N) Tanah (%)

5.4.1 Kandungan Nitrogen (N) Tanah Awal

Kandungan nitrogen (N) pada sampel tanah sebelum dilakukan proses bioremediasi. Data ini berfungsi sebagai acuan awal untuk mengetahui tingkat ketersediaan nitrogen yang merupakan indikator penting dalam menentukan kesuburan tanah.



Gambar 9. Kandungan Nitrogen (N) Tanah Awal

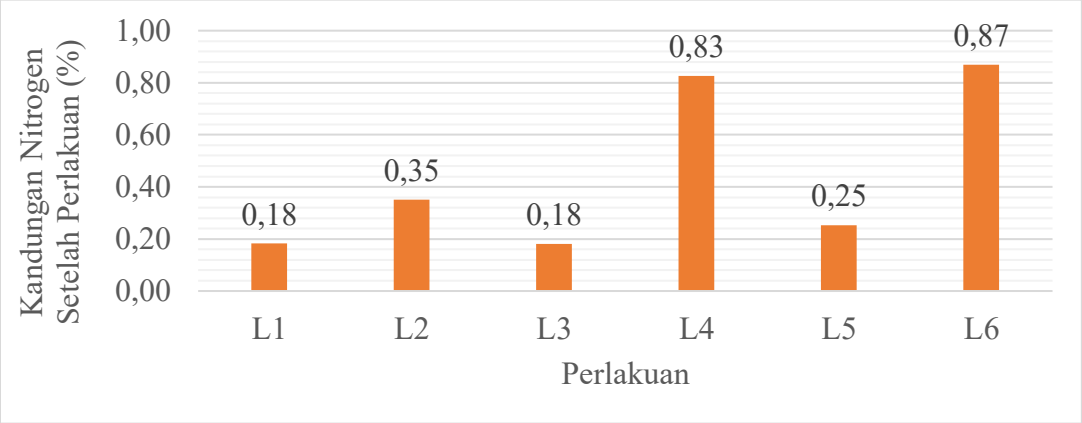
Gambar 9. Menunjukkan kandungan nitrogen (N) pada sampel tanah awal, nilai yang diperoleh adalah 0,17% untuk Top Soil, 0,15% untuk Morowali, dan 0,16% untuk Sorowako. Kandungan nitrogen tersebut menunjukkan variasi yang relatif kecil antar lokasi, namun secara keseluruhan berada pada kisaran yang cukup baik untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Nitrogen merupakan unsur hara makro penting yang berperan dalam sintesis protein, enzim, dan klorofil yang mendukung proses fotosintesis serta pertumbuhan vegetatif tanaman (Marschner, 2021).

Kandungan nitrogen tanah dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kandungan bahan organik, aktivitas mikroorganisme, serta kondisi fisik dan kimia tanah (Havlin et al., 2020). Dalam tanah pertanian, nilai kandungan nitrogen total sekitar 0,1% hingga 0,2% dianggap optimal untuk produksi tanaman yang baik (Brady & Weil, 2022). Namun, perlu diperhatikan bahwa tidak seluruh nitrogen total dalam tanah tersedia bagi tanaman; hanya sebagian kecil nitrogen mineral

yang dapat diserap secara langsung (Singh et al., 2023). Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan nitrogen dalam tanah perlu dilakukan untuk menjaga ketersediaan unsur hara yang optimal selama siklus pertumbuhan tanaman.

5.4.2 Kandungan Nitrogen (N) Tanah setelah Perlakuan

Perubahan kandungan nitrogen (N) setelah tanah mengalami perlakuan bioremediasi. Peningkatan kadar nitrogen pada beberapa sampel mencerminkan keberhasilan proses bioremediasi dalam memperbaiki kualitas tanah, khususnya dalam hal ketersediaan unsur hara nitrogen.



Gambar 10. Kandungan Nitrogen (N) Tanah setelah Perlakuan

Gambar 10. Menunjukkan kandungan nitrogen (N) setelah proses bioremediasi, terjadi peningkatan yang signifikan pada beberapa sampel tanah. Nilai kandungan nitrogen setelah bioremediasi pada sampel L1 dan L3 relatif stabil sebesar 0,18%, namun pada sampel L2, L4, L5, dan L6 menunjukkan peningkatan yang cukup mencolok, yaitu masing-masing 0,35%, 0,83%, 0,25%, dan 0,87%. Peningkatan ini menandakan bahwa proses bioremediasi efektif dalam memperbaiki kualitas tanah dengan meningkatkan kandungan nitrogen yang tersedia bagi tanaman.

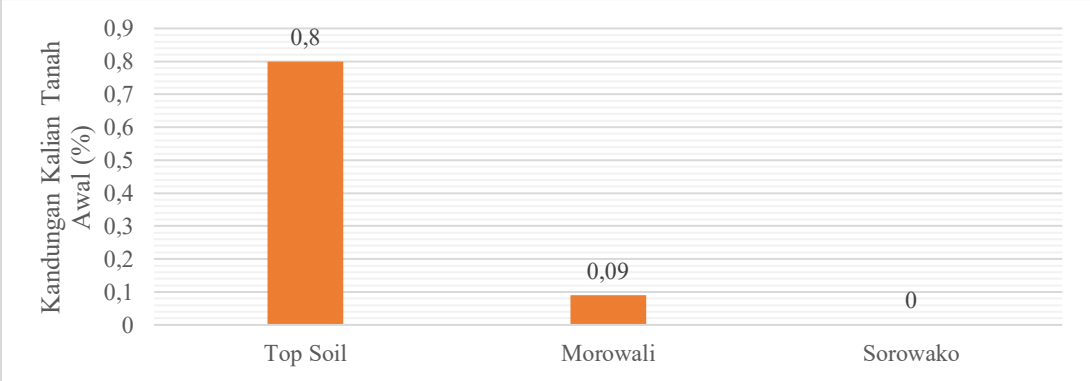
Proses bioremediasi yang melibatkan mikroorganisme tanah berperan penting dalam menguraikan bahan organik serta mengubah bentuk nitrogen yang tidak tersedia menjadi bentuk yang mudah diserap oleh tanaman, seperti amonium ($NH4^+$) dan nitrat ($NO3^-$) (Singh et al., 2022). Selain itu, peningkatan kandungan nitrogen juga dapat dikaitkan dengan peningkatan aktivitas mikroba yang berperan dalam siklus nitrogen, termasuk proses mineralisasi dan nitrifikasi (Chen et al., 2021). Dengan demikian, bioremediasi tidak hanya menghilangkan polutan atau kontaminan dari tanah, tetapi juga meningkatkan kesuburan tanah secara keseluruhan melalui peningkatan unsur hara seperti nitrogen.

Pengelolaan tanah menggunakan bioremediasi dapat menjadi metode berkelanjutan untuk memperbaiki tanah yang terdegradasi dan meningkatkan produktivitas tanaman tanpa ketergantungan pada pupuk kimia berlebihan (Zhang et al., 2023).

5.5 Kandungan Kalium (K) Tanah (%)

5.5.1 Kandungan Kalium (K) Tanah Awal

Kandungan kalium (K) pada sampel tanah sebelum dilakukan perlakuan bioremediasi. Kalium merupakan salah satu unsur hara makro penting yang berperan dalam berbagai proses fisiologis tanaman, seperti regulasi tekanan osmotik, aktivasi enzim, dan pembentukan protein. Data ini menunjukkan kondisi awal ketersediaan kalium dalam tanah yang menjadi dasar evaluasi efektivitas bioremediasi.



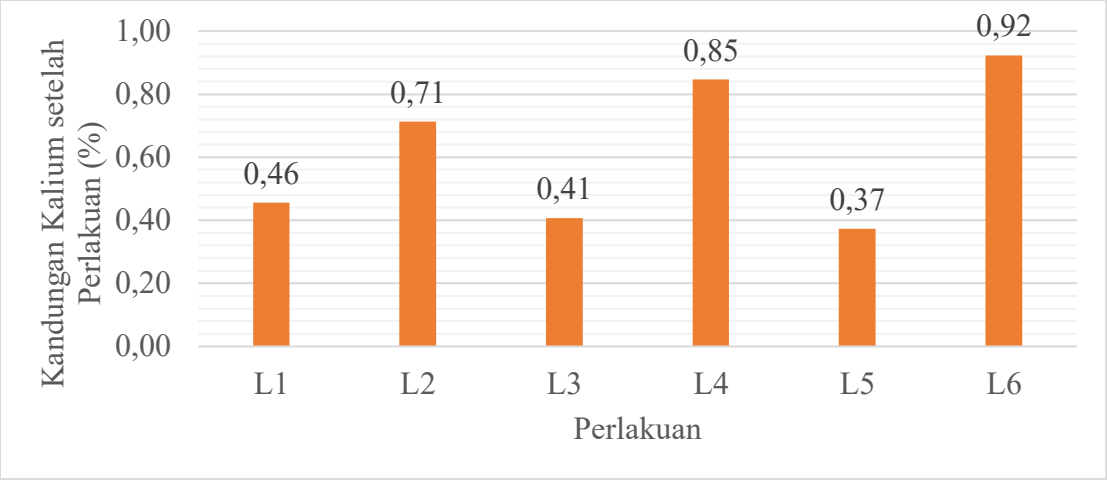
Gambar 11. Kandungan Kalium (K) Tanah Awal

Gambar 11. Menunjukkan kandungan K2O tanah awal, nilai yang diperoleh menunjukkan variasi yang signifikan antar lokasi. Sampel Top Soil memiliki kandungan K2O tertinggi sebesar 0,8%, sementara Morowali hanya 0,09%, dan Sorowako menunjukkan nilai 0%, yang menandakan ketersediaan kalium sangat rendah bahkan hampir tidak ada di lokasi tersebut. Kalium merupakan unsur hara makro yang sangat penting bagi tanaman karena berperan dalam berbagai proses fisiologis seperti regulasi tekanan osmotik, pembukaan dan penutupan stomata, serta aktivasi enzim yang mendukung fotosintesis dan sintesis protein (Marschner, 2021). Kandungan kalium dalam tanah sangat dipengaruhi oleh jenis tanah, kandungan mineral, serta aktivitas mikroorganisme yang dapat melepaskan kalium dari mineral dan bahan organik (Havlin et al., 2020).

Kadar kalium yang rendah seperti pada sampel Morowali dan Sorowako dapat mengindikasikan potensi defisiensi kalium yang dapat mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman jika tidak dilakukan pengelolaan yang tepat. Hal ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menyatakan bahwa ketersediaan kalium yang cukup di tanah merupakan faktor penting untuk menjaga produktivitas tanaman dan ketahanan terhadap stres lingkungan (Singh et al., 2022).

5.5.2 Kandungan Kalium (K) Tanah setelah Perlakuan

Perubahan kandungan kalium (K) setelah tanah mengalami proses bioremediasi. Peningkatan atau perubahan kandungan kalium menjadi indikator keberhasilan bioremediasi dalam memperbaiki kualitas tanah dan ketersediaan unsur hara esensial yang mendukung pertumbuhan tanaman.



Gambar 12. Kandungan Kalium (K) Tanah setelah Perlakuan

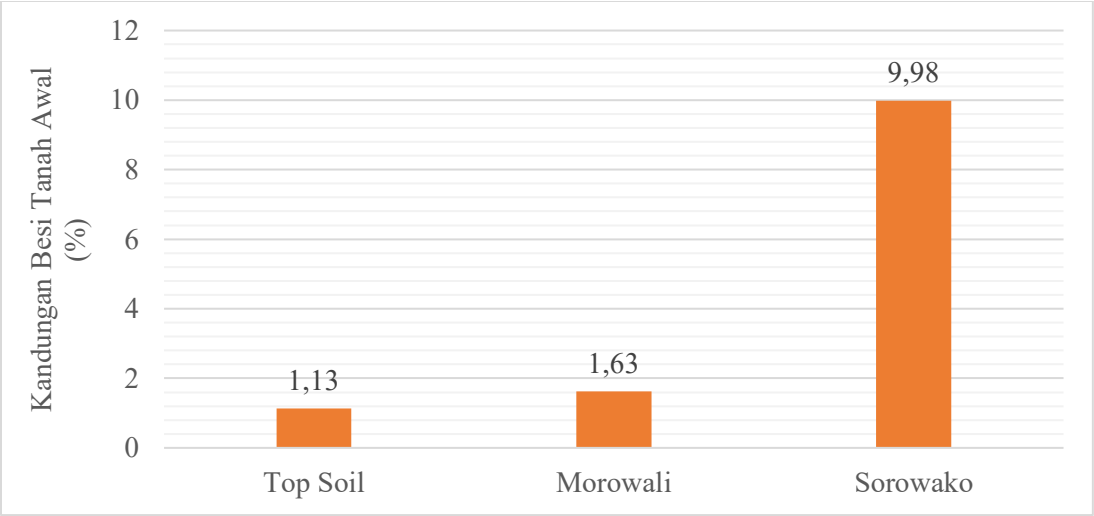
Gambar 12. Menunjukkan kandungan K2O setelah bioremediasi, terlihat adanya peningkatan signifikan pada semua sampel tanah dibandingkan dengan kondisi awal. Kandungan K2O pada sampel L1 hingga L6 berkisar antara 0,37% hingga 0,92%, dengan nilai tertinggi pada L6 sebesar 0,92%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses bioremediasi efektif dalam memperbaiki kandungan kalium tanah, yang sangat penting untuk menunjang pertumbuhan tanaman.

Kalium merupakan unsur hara esensial yang berperan dalam pengaturan tekanan osmotik, aktivasi enzim, serta sintesis protein dan fotosintesis pada tanaman (Marschner, 2021). Proses bioremediasi yang melibatkan mikroorganisme tanah dapat membantu melepaskan kalium yang terikat dalam mineral dan bahan organik sehingga menjadi lebih tersedia bagi tanaman (Chen et al., 2021). Selain itu, mikroorganisme juga berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah melalui dekomposisi bahan organik yang menghasilkan nutrisi penting termasuk kalium (Singh et al., 2022).

5.6 Kandungan Besi (Fe) Tanah (%)

5.6.1 Kandungan Besi (Fe) Tanah Awal

Kandungan besi (Fe) pada sampel tanah sebelum dilakukan proses bioremediasi. Besi merupakan unsur mikro esensial yang diperlukan tanaman dalam jumlah kecil, tetapi memiliki peran penting dalam proses fisiologis seperti pembentukan klorofil dan respirasi seluler. Data ini digunakan untuk mengetahui tingkat awal ketersediaan besi dalam tanah serta potensi akumulasi atau defisiensinya.



Gambar 13. Kandungan Besi (Fe) Tanah Awal

Gambar 13. Menunjukkan kandungan besi (Fe) tanah awal, ditemukan bahwa sampel Top Soil dan Morowali memiliki kadar Fe masing-masing sebesar 1,13% dan 1,63%, sementara sampel Sorowako menunjukkan kandungan yang sangat tinggi yaitu 9,98%. Kandungan besi yang tinggi pada tanah, seperti yang terlihat di Sorowako, umumnya disebabkan oleh kondisi geologi setempat, terutama pada wilayah yang kaya akan mineral lateritik atau tanah bekas pertambangan nikel, di mana akumulasi besi dan logam berat lainnya sering terjadi (Rieuwerts, 2021).

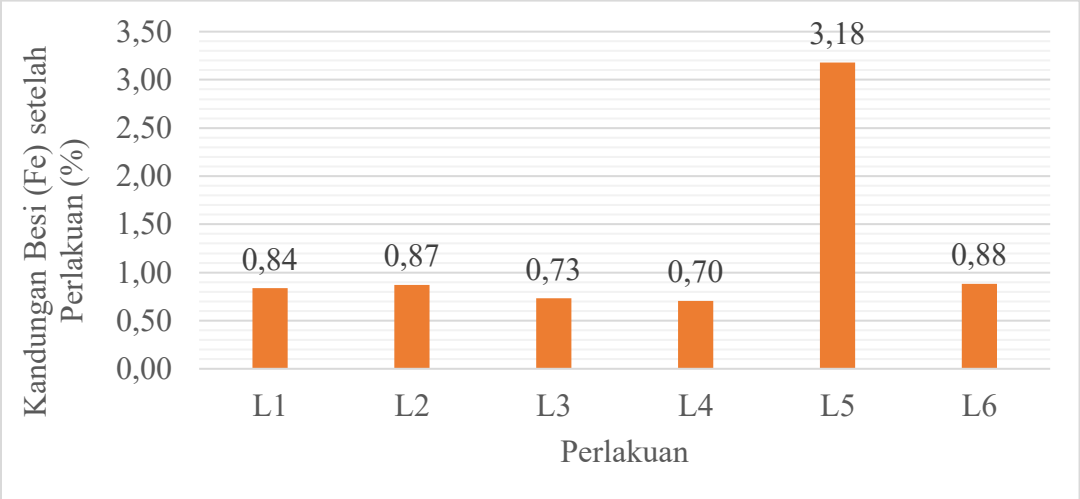
Besi merupakan unsur mikro esensial yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah kecil, terutama dalam proses pembentukan klorofil dan respirasi seluler. Namun, jika konsentrasinya terlalu tinggi, Fe dapat menjadi toksik bagi tanaman dan mikroorganisme tanah karena dapat mengganggu ketersediaan unsur hara lain seperti fosfor (P) dan mangan (Mn) (Marschner, 2021).

Di samping itu, kandungan Fe yang tinggi juga dapat menyebabkan ketidakseimbangan kimia tanah serta memengaruhi pH dan aktivitas enzim tanah (Alloway, 2019).

Kondisi ini menunjukkan pentingnya pengelolaan tanah yang mengandung logam berat, khususnya melalui pendekatan seperti bioremediasi, fitoremediasi, atau aplikasi bahan amelioran untuk menurunkan tingkat ketersediaan logam yang berlebih. Bioremediasi menggunakan mikroorganisme pelarut logam dapat membantu mengubah bentuk Fe menjadi kurang tersedia secara hayati, sehingga mengurangi toksisitasnya bagi tanaman dan makroorganisme tanah (Gadd, 2020).

5.6.2 Kandungan Besi (Fe) Tanah setelah Perlakuan

Perubahan kandungan besi (Fe) pada tanah setelah perlakuan bioremediasi. Perbandingan dengan data awal digunakan untuk menilai efektivitas bioremediasi dalam mengurangi kandungan logam berat (jika Fe berlebih) atau meningkatkan bioavailabilitasnya (jika sebelumnya rendah), sehingga tanah menjadi lebih sesuai untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.



Gambar 14. Kandungan Besi (Fe) Tanah setelah Perlakuan

Gambar 14. Menunjukkan kandungan besi (Fe) cukup tinggi sebesar 3,18%. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa proses bioremediasi efektif dalam menurunkan konsentrasi besi tanah, terutama pada sampel yang sebelumnya mengandung Fe dalam jumlah berlebih.

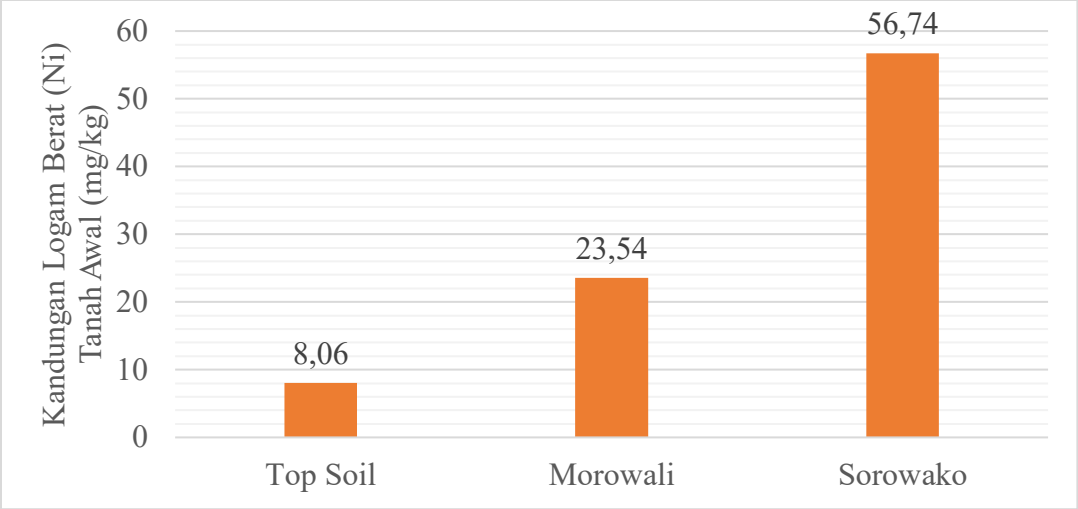
Besi (Fe) dalam konsentrasi tinggi dapat bersifat toksik bagi tanaman, menyebabkan gangguan pada penyerapan unsur hara lain serta menghasilkan radikal bebas yang merusak sel tanaman (Marschner, 2021). Bioremediasi, khususnya yang memanfaatkan mikroorganisme, terbukti mampu mengubah bentuk Fe dari yang mudah larut menjadi bentuk yang kurang tersedia secara hayati melalui proses oksidasi biologis, presipitasi, atau imobilisasi (Gadd, 2020). Mikroba seperti *Pseudomonas* dan *Bacillus* diketahui memiliki kemampuan dalam mengurangi bioavailabilitas logam berat, termasuk Fe, melalui pembentukan senyawa kompleks atau biomineralisasi (Chen et al., 2021).

Penurunan kadar Fe pada sebagian besar sampel mengindikasikan keberhasilan mikroorganisme dalam mengelola kelebihan logam berat di tanah. Namun, kadar Fe yang masih tinggi pada L5 menunjukkan kemungkinan adanya faktor lain yang mempengaruhi efektivitas bioremediasi, seperti konsentrasi awal yang terlalu tinggi, aktivitas mikroba yang belum optimal, atau kondisi tanah yang tidak mendukung proses biotransformasi logam.

5.7 Kandungan Logam Berat (Ni) Tanah (mg/kg)

5.7.1 Kandungan Logam Berat (Ni) Tanah Awal

Kandungan logam berat Nikel (Ni) pada sampel tanah sebelum dilakukan proses bioremediasi. Nikel merupakan logam yang secara alami terdapat di lingkungan, namun dalam konsentrasi tinggi dapat menjadi toksik bagi tanaman dan organisme tanah. Analisis awal ini penting untuk mengetahui tingkat kontaminasi nikel sebagai dasar evaluasi efektivitas perlakuan bioremediasi yang akan dilakukan.



Gambar 15. Kandungan Logam Berat (Ni) Tanah Awal

Gambar 15. Menunjukkan kandungan nikel (Ni) tanah awal, terlihat bahwa tingkat kontaminasi Ni sangat bervariasi antar lokasi. Sampel Top Soil memiliki kandungan Ni sebesar 8,06 mg/kg, Morowali sebesar 23,54 mg/kg, dan Sorowako menunjukkan kadar tertinggi yakni 56,74 mg/kg. Kandungan Ni yang tinggi, terutama di wilayah Sorowako dan Morowali, menunjukkan adanya potensi pencemaran logam berat, yang dapat berasal dari aktivitas pertambangan nikel dan pelapukan batuan ultrabasa yang umum dijumpai di wilayah tersebut (Alloway, 2019).

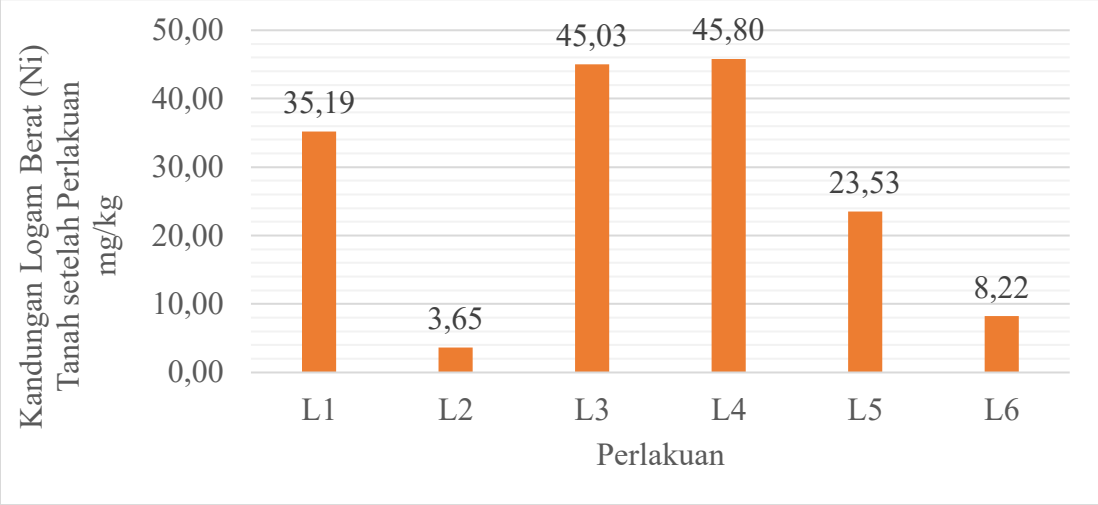
Nikel dalam jumlah kecil memang dibutuhkan sebagai unsur mikro bagi tanaman, namun jika kadarnya melebihi ambang batas, dapat menyebabkan fitotoksisitas yang ditandai dengan gangguan pertumbuhan akar, penurunan produksi klorofil, serta kerusakan membran sel (Chen et al., 2020). Selain itu, keberadaan Ni dalam jumlah tinggi juga dapat memengaruhi keseimbangan mikroorganisme tanah dan merusak struktur tanah secara biologis.

Menurut WHO dan FAO, batas aman kandungan Ni dalam tanah pertanian berkisar antara 0,5 hingga 10 mg/kg, tergantung jenis tanah dan kondisi lokal (WHO, 2021). Artinya, nilai Ni pada ketiga lokasi tersebut, khususnya Morowali dan Sorowako, telah melebihi batas aman dan berpotensi membahayakan lingkungan serta kesehatan manusia jika masuk ke rantai makanan.

Oleh karena itu, diperlukan upaya remediasi, salah satunya melalui bioremediasi, untuk menurunkan kadar logam berat tersebut dengan memanfaatkan mikroorganisme yang mampu memobilisasi, mengakumulasi, atau mengendapkan Ni dalam bentuk yang kurang toksik (Gadd, 2020).

5.7.2 Kandungan Logam Berat (Ni) Tanah setelah Perlakuan

Perubahan kadar nikel (Ni) dalam tanah setelah perlakuan bioremediasi. Penurunan kadar nikel menunjukkan efektivitas proses bioremediasi dalam mereduksi logam berat berbahaya, menjadikan tanah lebih aman dan sesuai untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan.



Gambar 16. Kandungan Logam Berat (Ni) Tanah setelah Perlakuan

Gambar 16. Menunjukkan kandungan Nikel (Ni) setelah proses bioremediasi, diperoleh data bahwa kadar Ni dalam sampel tanah menunjukkan variasi yang cukup signifikan. Sampel L2 (3,65 mg/kg) dan L6 (8,22 mg/kg) mengalami penurunan konsentrasi Ni hingga mendekati atau berada dalam ambang batas aman menurut standar FAO/WHO, yaitu maksimal 10 mg/kg untuk tanah pertanian (WHO, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa bioremediasi pada sampel tersebut berjalan efektif dalam menurunkan kandungan logam berat nikel ke tingkat yang lebih ramah lingkungan.

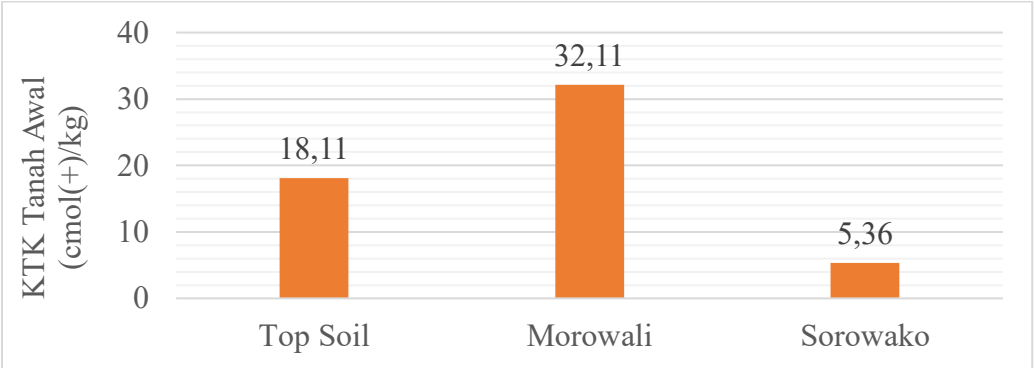
Namun, pada sampel L1 (35,19 mg/kg), L3 (45,03 mg/kg), L4 (45,80 mg/kg), dan L5 (23,53 mg/kg), kadar Ni masih tergolong tinggi pasca-bioremediasi. Hal ini mengindikasikan bahwa efektivitas bioremediasi bersifat lokasi-spesifik dan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis mikroorganisme yang digunakan, tingkat awal kontaminasi, kondisi tanah (pH, bahan organik), serta lama waktu perlakuan (Gadd, 2020). Rendahnya efektivitas pada beberapa sampel bisa juga disebabkan oleh konsentrasi awal Ni yang terlalu tinggi, sehingga memerlukan waktu atau perlakuan tambahan agar bisa menurun secara signifikan.

Nikel dalam konsentrasi tinggi diketahui bersifat toksik bagi tanaman, mengganggu penyerapan unsur hara penting seperti Fe, Mg, dan Ca, serta merusak sistem enzimatik dalam sel tanaman (Chen et al., 2020).

5.8 KTK (Kapasitas Tukar Kation) Tanah (cmol(+)/kg)

5.8.1 KTK (Kapasitas Tukar Kation) Tanah Awal

Nilai KTK (Kapasitas Tukar Kation) pada tanah sebelum dilakukan proses bioremediasi. KTK merupakan indikator penting untuk menilai kemampuan tanah dalam menahan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman. Nilai KTK dipengaruhi oleh tekstur tanah, kandungan bahan organik, serta jenis mineral liat. Analisis awal KTK ini bertujuan untuk mengetahui kondisi kesuburan kimia tanah sebelum dilakukan perlakuan perbaikan kualitas.



Gambar 17. KTK (Kapasitas Tukar Kation) Tanah Awal

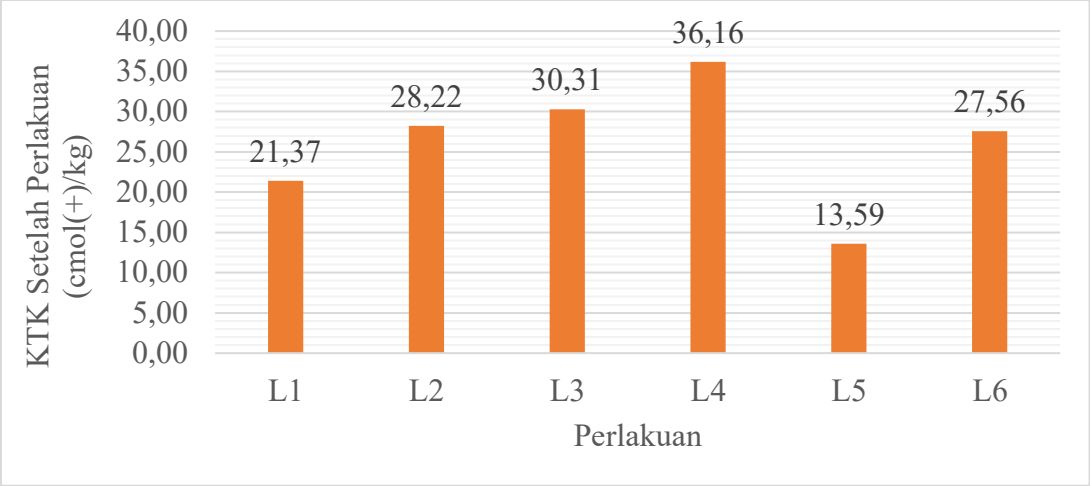
Gambar 17. Menunjukkan Berdasarkan hasil analisis awal kapasitas tukar kation (KTK) pada tiga sampel tanah, ditemukan bahwa nilai KTK bervariasi cukup signifikan. Sampel tanah dari Morowali menunjukkan nilai tertinggi yaitu 32,11 cmol(+)/kg, diikuti oleh Top Soil sebesar 18,11 cmol(+)/kg, sedangkan nilai terendah ditemukan pada sampel dari Sorowako, yaitu hanya 5,36 cmol(+)/kg. Nilai KTK ini mencerminkan kemampuan tanah dalam menyerap dan mempertahankan ion-ion hara yang penting bagi pertumbuhan tanaman.

Tanah dengan nilai KTK tinggi, seperti yang ditunjukkan oleh sampel Morowali, umumnya memiliki kandungan bahan organik dan mineral liat yang baik, sehingga mampu menyediakan cadangan unsur hara dalam jumlah cukup bagi tanaman (Brady & Weil, 2020). Sebaliknya, nilai KTK yang rendah seperti pada tanah Sorowako mengindikasikan kondisi tanah yang miskin bahan organik atau bertekstur kasar (misalnya pasir), sehingga memiliki kemampuan rendah dalam menahan unsur hara dan cenderung mudah mengalami pencucian nutrisi (Havlin et al., 2021).

Nilai KTK antara 16–25 cmol(+)/kg tergolong sedang, sedangkan nilai di atas 25 dianggap tinggi, dan di bawah 10 tergolong rendah (Sudirman et al., 2022). Maka dari itu, Sorowako dengan KTK 5,36 menunjukkan bahwa tanah di daerah tersebut perlu perbaikan melalui penambahan bahan organik atau perlakuan lain untuk meningkatkan daya dukung kesuburannya. Nilai tinggi pada Morowali menunjukkan tanahnya berpotensi lebih subur secara kimiawi, namun tetap perlu dikaji lebih lanjut dari aspek biologis dan fisik.

5.8.2 KTK (Kapasitas Tukar Kation) Tanah setelah Perlakuan

Nilai KTK setelah perlakuan bioremediasi. Peningkatan nilai KTK menunjukkan perbaikan kemampuan tanah dalam menyerap dan mempertahankan unsur hara, yang menjadi indikasi keberhasilan bioremediasi. Data ini penting untuk mengevaluasi dampak bioremediasi terhadap peningkatan kualitas tanah dan kesuburan jangka panjang.



Gambar 18. KTK (Kapasitas Tukar Kation) Tanah setelah Perlakuan

Gambar 18. Menunjukkan kapasitas tukar kation (KTK) setelah perlakuan bioremediasi, terjadi peningkatan nilai KTK pada sebagian besar sampel. Sampel L4 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 36,16 cmol(+)/kg, diikuti oleh L3 sebesar 30,31 cmol(+)/kg, dan L2 sebesar 28,22 cmol(+)/kg. Nilai KTK pada sampel L1 dan L6 masing-masing sebesar 21,37 dan 27,56 cmol(+)/kg, sedangkan nilai terendah ditunjukkan oleh L5, yaitu 13,59 cmol(+)/kg.

Peningkatan nilai KTK ini mencerminkan keberhasilan proses bioremediasi dalam memperbaiki kualitas kimia tanah. Proses bioremediasi, terutama yang melibatkan mikroorganisme dan penambahan bahan organik, dapat meningkatkan kandungan koloid organik dan mineral liat, yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan daya tukar kation tanah (Brady & Weil, 2020). Tanah dengan KTK tinggi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman, sehingga mendukung kesuburan tanah secara berkelanjutan (Havlin et al., 2021).

Menurut klasifikasi umum, nilai KTK di atas 25 cmol(+)/kg dikategorikan sebagai tinggi, 16–25 sebagai sedang, dan di bawah 10 sebagai rendah (Sudirman et al., 2022). Maka dari itu,

hampir semua sampel setelah bioremediasi berada pada kategori sedang hingga tinggi, kecuali L5 yang masih dalam kategori rendah–sedang.

5.9 Jumlah Daun (helai)

5.9.1 Jumlah Daun Minggu (1)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap jumlah daun 1 MST tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Rerata jumlah daun minggu 1

L	P			rata-rata	NP. Tukey α 0.05
	P1	P2	P3		
L1	2,83	2,67	2,67	2,72a	0,8
L2	2,67	2,83	2,50	2,67a	
L3	2,83	2,33	2,83	2,67a	
L4	2,83	2,83	2,50	2,72a	
L5	2,00	2,33	1,83	2,06b	
L6	2,50	2,00	2,17	2,22b	
rata-rata	2,61	2,50	2,42		
NP. Tukey α 0.05	0,43				

Berdasarkan Tabel 1 mengenai rerata jumlah daun pada minggu pertama, diketahui bahwa perlakuan L1, L2, L3, dan L4 menghasilkan jumlah daun tertinggi, yaitu antara 2,67 hingga 2,72 helai. Keempat perlakuan ini masuk dalam kelompok yang sama (a) berdasarkan uji Tukey pada taraf nyata 5% dengan nilai beda nyata (NP) sebesar 0,43. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan tersebut secara statistik tidak berbeda nyata satu sama lain dan memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan awal tanaman, khususnya dalam pembentukan daun. Sementara itu, perlakuan L5 dan L6 menunjukkan hasil yang lebih rendah, yaitu masing-masing 2,06 dan 2,22 helai daun, dan tergolong dalam kelompok berbeda (b), menandakan adanya perbedaan nyata dibandingkan perlakuan lainnya.

Jumlah daun pada fase awal pertumbuhan merupakan indikator penting karena berkaitan langsung dengan kemampuan tanaman melakukan fotosintesis. Daun yang lebih banyak memungkinkan tanaman menyerap cahaya matahari secara lebih efektif dan menghasilkan energi untuk pertumbuhan vegetatif. Menurut Sutanto (2020), ketersediaan unsur hara seperti nitrogen dan fosfor sangat berpengaruh terhadap perkembangan daun, sehingga kondisi tanah yang mendukung akan mendorong pembentukan daun secara optimal. Oleh karena itu, perbedaan hasil jumlah daun ini bisa disebabkan oleh variasi tingkat kesuburan tanah hasil bioremediasi di masing-masing perlakuan.

Efektivitas bioremediasi sangat menentukan hasil pertumbuhan tanaman. Perlakuan yang mampu meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah dan memperbaiki struktur tanah cenderung menghasilkan pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Hartati et al. (2021) menyatakan bahwa bioremediasi yang berhasil dapat memperbaiki kondisi tanah tercemar dan meningkatkan ketersediaan unsur hara, yang pada akhirnya mempercepat pemulihan fungsi tanah sebagai media tumbuh. Hal ini tercermin dari hasil L1 hingga L4 yang menunjukkan hasil pertumbuhan lebih tinggi dibandingkan L5 dan L6.

5.9.2 Jumlah Daun Minggu (2)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap jumlah daun 2 MST tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Rerata jumlah daun minggu (2)

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	4,50	4,00	4,17	4,22ab	1,4
L2	4,17	4,17	4,33	4,22ab	

L3	3,67	3,50	3,83	3,67bc
L4	4,50	4,50	4,50	4,50a
L5	2,67	2,50	2,00	2,39c
L6	3,33	3,83	3,50	3,56bc
rata-rata	3,81	3,75	3,72	
NP. Tukey *a*0.05	0,79			

Berdasarkan tabel 2, Hasil pengamatan pada minggu ke-2 menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan antara faktor L dan P memengaruhi jumlah daun tanaman, meskipun tidak seluruhnya menunjukkan perbedaan yang signifikan secara statistik. Berdasarkan data pada Tabel 2, rata-rata jumlah daun tertinggi diperoleh pada perlakuan L4 sebesar 4,50, yang secara statistik berbeda nyata dari perlakuan dengan nilai lebih rendah, sesuai dengan nilai batas nyata Tukey $\alpha = 0,05$ sebesar 0,79. Perlakuan L1 dan L2 masing-masing menghasilkan nilai rata-rata 4,22, yang tidak berbeda nyata dari L4, tetapi berbeda nyata dari perlakuan dengan nilai lebih rendah, dan keduanya dikelompokkan dalam huruf ab.

Perlakuan L3 dan L6 menunjukkan rata-rata jumlah daun sebesar 3,67 dan 3,56, tidak berbeda nyata satu sama lain namun berbeda dengan L4 dan L5. Adapun perlakuan dengan rata-rata terendah adalah L5, yaitu sebesar 2,39, yang secara statistik berbeda nyata dari seluruh perlakuan. Hasil ini menunjukkan bahwa faktor perlakuan L (yang bisa diasosiasikan dengan jenis perlakuan atau lingkungan pertumbuhan) berperan penting dalam mempengaruhi pembentukan daun pada tahap awal pertumbuhan tanaman.

Keberhasilan pertumbuhan daun pada minggu kedua sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan atau perlakuan yang diberikan. Tanaman pada perlakuan L4, misalnya, kemungkinan mendapat perlakuan yang lebih optimal dalam hal ketersediaan nutrisi, pencahayaan, atau kelembaban, yang mendukung aktivitas meristematik daun. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Rahman et al. (2022) menekankan bahwa perbedaan jumlah daun secara statistik dapat

mencerminkan efektivitas perlakuan dalam mendorong aktivitas fisiologis tanaman, seperti fotosintesis dan pembelahan sel, yang berkontribusi pada perkembangan organ daun.

5.9.3 Jumlah Daun Minggu (3)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap jumlah daun 3 MST tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Rerata jumlah daun minggu (3)

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	4,50	3,67	3,83	4,00bc	1,3
L2	6,17	5,83	6,33	6,11ab	
L3	3,83	3,33	4,00	3,72bc	
L4	7,00	6,50	7,00	6,83a	
L5	1,50	1,83	1,67	1,67c	
L6	6,17	5,00	6,33	5,83ab	
rata-rata	4,86	4,36	4,86		
NP. Tukey *α0.05*	0,74				

Berdasarkan hasil pada Tabel 3, jumlah daun tanaman pada minggu kedua menunjukkan variasi yang lebih jelas antar perlakuan. Perlakuan terbaik ditunjukkan oleh L4 dengan rerata 6,83 helai daun, berdasarkan uji Tukey dengan nilai beda nyata (NP) sebesar 0,74. Perlakuan L2 dan L6 mengikuti dengan rata-rata masing-masing 6,11 dan 5,83, tidak berbeda nyata dengan L4, namun juga tidak sama dengan kelompok lebih rendah. Perlakuan L1 dan L3 menghasilkan rata-rata daun yang lebih rendah, yaitu 4,00 dan 3,72 sedangkan perlakuan L5 menunjukkan hasil paling rendah, yaitu 1,67 helai daun.

Peningkatan jumlah daun pada minggu kedua umumnya mencerminkan keberlanjutan pertumbuhan tanaman setelah fase adaptasi awal. Kondisi ini juga menunjukkan sejauh mana perlakuan bioremediasi mampu memperbaiki media tanam agar mendukung pertumbuhan

vegetatif. Menurut Sutanto (2020), pertumbuhan daun sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara, khususnya nitrogen dan fosfor, serta lingkungan tumbuh yang mendukung seperti kelembaban dan aerasi tanah. Perlakuan seperti L4 yang mampu mempertahankan jumlah daun tinggi diduga telah berhasil menciptakan lingkungan tanah yang subur dan stabil bagi tanaman.

Rendahnya jumlah daun pada perlakuan L5 menunjukkan bahwa kondisi tanah di lokasi tersebut kemungkinan masih belum optimal pasca bioremediasi. Seperti dijelaskan oleh Hartati et al. (2021), efektivitas bioremediasi sangat bergantung pada jenis mikroorganisme yang digunakan, lama proses, serta tingkat pencemaran tanah sebelumnya. Jika bioremediasi belum sepenuhnya efektif, maka ketersediaan unsur hara dan struktur tanah masih belum cukup baik untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.

5.10 Panjang Daun (cm)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap panjanga daun tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Rerata panjang daun

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	22,55	21,64	21,93	22,04b	6,5
L2	25,44	27,58	26,75	26,59ab	
L3	21,10	16,75	22,99	20,28b	
L4	31,59	29,96	26,98	29,51a	
L5	6,27	7,32	4,53	6,04c	
L6	24,41	16,44	19,84	20,23b	
rata-rata	21,89	19,95	20,51		
NP. Tukey *α0.05*	3,60				

Hasil pada Tabel 4, menunjukkan bahwa perlakuan L4 memberikan rerata panjang daun tertinggi yaitu 29,51 cm, yang secara signifikan berbeda dengan perlakuan lain berdasarkan uji Tukey pada taraf signifikansi 5% (NP Tukey = 6,5). Perlakuan L2 dengan rerata 26,59 cm tidak

berbeda nyata dengan L4, tetapi berbeda dengan perlakuan yang lebih rendah. Perlakuan L1, L3, dan L6 memiliki rerata yang relatif sama sedangkan perlakuan L5 memberikan rerata panjang daun terendah sebesar 6,04 cm. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan nyata pada panjang daun yang disebabkan oleh perlakuan yang diberikan.

Perbedaan panjang daun yang signifikan antar perlakuan ini kemungkinan besar berkaitan dengan faktor nutrisi tanah dan efektivitas bioremediasi yang dilakukan. Menurut Brady dan Weil (2010), kandungan unsur hara makro dan mikro yang cukup di dalam tanah sangat berpengaruh pada pertumbuhan daun dan keseluruhan perkembangan tanaman. Perlakuan L4 yang menghasilkan panjang daun terbesar diduga memiliki kandungan hara dan kondisi tanah yang paling optimal untuk pertumbuhan daun dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Jones et al. (2017) yang menyatakan bahwa kualitas tanah yang baik dapat meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman sehingga mempengaruhi ukuran daun.

Bioremediasi yang efektif juga berperan dalam memperbaiki struktur dan kesuburan tanah, yang pada akhirnya mendukung pertumbuhan tanaman. Menurut Zhang et al. (2019), penggunaan mikroorganisme dalam bioremediasi mampu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, sehingga tanaman dapat tumbuh lebih optimal, termasuk dalam hal panjang daun

5.11 Tinggi Tanaman (cm)

5.11.1 Tinggi Tanaman Minggu (1)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman 1 MST tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Rerata tinggi tanaman minggu pertama

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		

L1	13,50	12,10	12,43	12,68a	3,4
L2	11,33	11,15	12,32	11,60ab	
L3	13,95	11,42	13,65	13,01a	
L4	13,75	13,45	11,57	12,92a	
L5	6,83	8,10	5,55	6,83c	
L6	11,22	7,77	8,93	9,31b	
rata-rata	11,76	10,66	10,74		
NP. Tukey *α0.05*	1,89				

Hasil pada Tabel 5, menunjukkan bahwa perlakuan L1, L3, dan L4 memberikan rerata tinggi tanaman minggu pertama yang paling tinggi, yaitu masing-masing 12,68 cm, 13,01 cm, dan 12,92 cm tidak berbeda nyata. Perlakuan L2 dengan rerata 11,60 cm menunjukkan perbedaan tidak signifikan. Sedangkan perlakuan L6 dan L5 memiliki rerata tinggi tanaman yang lebih rendah, yaitu 9,31 cm dan 6,83 cm dengan L5 sebagai perlakuan dengan pertumbuhan terendah. Hal ini menunjukkan adanya variasi yang cukup nyata dalam pertumbuhan tinggi tanaman yang dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan.

Perbedaan tinggi tanaman yang diamati dapat disebabkan oleh kualitas media tanam dan perlakuan yang mempengaruhi ketersediaan unsur hara serta kondisi fisik tanah. Menurut Brady dan Weil (2010), tinggi tanaman sangat bergantung pada kecukupan nutrisi serta kondisi lingkungan tumbuh yang optimal. Perlakuan dengan hasil tertinggi kemungkinan menyediakan kondisi tanah yang lebih baik sehingga tanaman dapat tumbuh lebih cepat dan tinggi pada minggu pertama masa tanam. Hal ini penting karena pertumbuhan awal yang baik akan berkontribusi pada hasil panen yang optimal (Taiz et al., 2015).

Bioremediasi yang diterapkan pada beberapa perlakuan diyakini dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi kontaminan yang menghambat pertumbuhan tanaman. Zhang et al. (2019) menjelaskan bahwa bioremediasi mampu memperbaiki sifat kimia dan fisika tanah, yang mendukung pertumbuhan akar dan penyerapan nutrisi.

5.11.2 Tinggi Tanaman Minggu (2)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman 2 MST tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Rerata tinggi tanaman minggu (2)

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	36,53	33,58	32,45	34,19ab	9,0
L2	36,38	40,58	37,18	38,05a	
L3	32,93	27,53	34,47	31,64ab	
L4	43,05	41,22	39,22	41,16a	
L5	9,33	12,10	15,43	12,29c	
L6	34,73	21,68	32,57	29,66b	
rata-rata	32,16	29,45	31,89		
NP. Tukey *α0.05*	4,99				

Rerata tinggi tanaman pada minggu kedua menunjukkan adanya variasi yang signifikan antar perlakuan. Perlakuan L4 menghasilkan tinggi tanaman tertinggi dengan nilai 41,16 cm dan L2 dengan tinggi 38,05 cm. Hal ini menunjukkan kedua perlakuan tersebut memberikan hasil pertumbuhan yang terbaik dan tidak berbeda nyata. Perlakuan L1 (34,19 cm) dan L3 (31,64 cm) yang menunjukkan tinggi tanaman sedikit lebih rendah, tetapi masih cukup dekat dengan perlakuan terbaik. Perlakuan L6 memiliki tinggi tanaman 29,66 cm, hasil pertumbuhan yang lebih rendah dibandingkan perlakuan terbaik.

Perbedaan tinggi tanaman ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh perbedaan kondisi tanah dan perlakuan yang diberikan. Nutrisi dan kualitas tanah yang baik sangat berperan dalam pertumbuhan tanaman. Menurut Taiz dan Zeiger (2010), nitrogen dan unsur hara lainnya sangat penting dalam proses pembentukan jaringan tanaman, sehingga ketersediaan unsur tersebut secara optimal dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman. Perlakuan L4 dan L2 mungkin menyediakan kondisi nutrisi dan lingkungan tanah yang lebih baik sehingga mendukung pertumbuhan tinggi tanaman.

Perlakuan yang melibatkan bioremediasi dapat membantu memperbaiki kualitas tanah dengan mengurangi kontaminan dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah. Hal ini berdampak positif terhadap penyerapan nutrisi oleh tanaman, sehingga mendorong pertumbuhan yang lebih baik (Garbisu & Alkorta, 2003).

5.11.3 Tinggi Tanaman Minggu (3)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman 3 MST tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Rerata tinggi tanaman minggu (3)

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	43,38	33,85	42,05	39,76b	14,8
L2	59,22	61,88	60,25	60,45a	
L3	42,03	29,03	46,12	39,06ba	
L4	59,90	68,25	66,14	64,76a	
L5	7,45	10,28	6,95	8,23c	
L6	56,42	35,12	53,88	48,47ab	
rata-rata	44,73	39,74	45,90		
NP. Tukey *α0.05*	8,24				

Rerata tinggi tanaman pada minggu ketiga menunjukkan variasi yang signifikan antar perlakuan. Perlakuan L4 menghasilkan tinggi tanaman tertinggi dengan rata-rata 64,76 cm dan perlakuan L2 dengan tinggi 60,45 cm. Kedua perlakuan ini menunjukkan pertumbuhan tanaman terbaik dan tidak berbeda nyata satu sama lain. Perlakuan L6 dengan tinggi 48,47 cm hasil pertumbuhan yang masih cukup baik, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan L2 dan L4. Sementara itu, perlakuan L1 dan L3 dengan tinggi tanaman masing-masing 39,76 cm dan 39,06 cm, menunjukkan pertumbuhan yang moderat. Perlakuan L5 menghasilkan tinggi tanaman terendah sebesar 8,23 cm pertumbuhan tanaman pada perlakuan ini paling kurang optimal.

Perbedaan tinggi tanaman yang signifikan ini kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan perlakuan yang diberikan selama proses bioremediasi. Perlakuan L2 dan L4 yang menghasilkan tinggi tanaman terbaik mungkin menyediakan kondisi nutrisi yang optimal dan tanah yang lebih subur, sehingga tanaman dapat tumbuh dengan maksimal. Hal ini sesuai dengan pernyataan Taiz dan Zeiger (2010) yang menyebutkan bahwa pertumbuhan tanaman sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara dan kondisi tanah yang baik.

5.12 Berat Basah Tanaman (gram)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap berat basah tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Rerata berat basah tanaman

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	2,49	3,13	1,92	2,52b	1,1
L2	3,74	2,05	3,19	2,99ab	
L3	2,08	1,37	2,17	1,87c	
L4	4,23	3,82	4,23	4,09a	
L5	0,47	0,57	0,48	0,51d	
L6	3,23	2,34	2,72	2,76b	
rata-rata	2,71	2,21	2,45		
NP. Tukey *α0.05*	0,63				

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 8, rerata berat basah tanaman, perlakuan L4 memberikan hasil tertinggi dengan nilai rerata 4,09 gram berbeda nyata dari semua perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan pada L4 mampu menciptakan kondisi yang paling optimal bagi pertumbuhan biomassa tanaman secara keseluruhan. Faktor-faktor seperti pencahayaan, ketersediaan air, dan hara yang seimbang sangat mungkin berperan penting dalam mendukung hasil tersebut (Gardner et al., 1991).

Perlakuan L1 dan L6 dengan berat basah masing-masing 2,52 gram dan 2,76 gram, menunjukkan performa yang cukup baik. Perlakuan L2 tidak berbeda nyata dari L4 maupun dari L1 dan L6. Hal ini karena kondisi lingkungan tidak seideal L4, perlakuan L2 tetap mampu mendukung pertumbuhan biomassa tanaman secara relatif baik.

Perlakuan L3 dan L5 menunjukkan hasil yang paling rendah, dengan nilai rerata masing-masing 1,87 gram dan 0,51 gram. Rendahnya berat basah tanaman pada kedua perlakuan ini menunjukkan adanya keterbatasan dalam faktor pertumbuhan, seperti rendahnya penyerapan air atau nutrisi, atau kondisi media tanam yang tidak mendukung. Berat basah tanaman sangat erat kaitannya dengan akumulasi air dan pertumbuhan jaringan tanaman aktif, sehingga kondisi lingkungan yang sub-optimal secara langsung akan menurunkan parameter ini (Salisbury & Ross, 1995).

Perlakuan yang baik terhadap faktor lingkungan tumbuh seperti kelembapan, aerasi media, dan pencahayaan sangat berpengaruh terhadap berat basah tanaman. Bobot basah merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kesehatan dan perkembangan vegetatif tanaman, karena mencerminkan kemampuan tanaman dalam menyerap dan menyimpan air serta mengakumulasi hasil fotosintesis (Taiz & Zeiger, 2010).

5.13 Berat Kering Tanaman (gram)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap berat kering tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Rerata berat kering tanaman

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	0,97	1,12	0,79	0,96b	0,4
L2	1,29	0,78	0,78	0,95b	
L3	0,83	0,50	0,99	0,77c	
L4	1,42	1,22	1,40	1,35a	
L5	0,27	0,30	0,17	0,25d	
L6	1,14	0,80	0,89	0,94b	
rata-rata	0,99	0,79	0,84		
NP. Tukey *α0.05*	0,21				

Berdasarkan data pada Tabel 9, terlihat bahwa perlakuan yang diberikan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap hasil berat kering. Perlakuan L4 menunjukkan nilai berat kering tertinggi dengan rerata 1,35 gram berbeda sangat nyata dari perlakuan lainnya, Hal ini sejalan dengan pendapat Taiz & Zeiger (2010) bahwa berat kering merupakan indikator langsung dari pertumbuhan dan produktivitas tanaman yang dipengaruhi oleh faktor genetik dan lingkungan.

Perlakuan L1, L2, dan L6 dengan rerata berturut-turut 0,96 gram, 0,95 gram, dan 0,94 gram. Perlakuan ini tidak berbeda nyata satu sama lain dan masih menunjukkan kapasitas pertumbuhan yang cukup baik. Perbedaan ini bisa dipengaruhi oleh variasi dalam kemampuan tanaman menyerap nutrisi dan air serta perbedaan dalam intensitas cahaya atau aerasi media tanam. Sebagaimana dijelaskan oleh Gardner et al. (1991), pertumbuhan biomassa tanaman sangat dipengaruhi oleh kesesuaian faktor lingkungan mikro yang mendukung respirasi dan transpirasi tanaman.

Sementara itu, L3 menunjukkan hasil lebih rendah 0,77 gram, penurunan berat kering ini bisa disebabkan oleh ketidakseimbangan faktor lingkungan atau rendahnya efisiensi penggunaan cahaya dalam proses fotosintesis. Perlakuan L5 memiliki hasil terendah dengan rerata berat kering 0,25 gram, dan berbeda sangat nyata dibandingkan perlakuan lainnya . Menurut (Salisbury & Ross,

1995), hal ini menunjukkan bahwa kondisi pada perlakuan ini tidak mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal, baik dari sisi fisiologis maupun morfologis.

5.14 Panjang Akar (cm)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap panjang akar tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 10.

Tabel 10. Rerata panjang akar tanaman

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	21,00	18,23	27,60	22,28b	6,6
L2	19,87	17,63	14,97	17,49b	
L3	33,63	27,23	26,60	29,16a	
L4	17,83	19,50	23,57	20,30b	
L5	4,70	2,47	2,83	3,33c	
L6	15,23	15,27	13,90	14,80bc	
rata-rata	18,71	16,72	18,24		
NP. Tukey *α0.05*	3,70				

Berdasarkan Tabel 10, terlihat bahwa terdapat pengaruh yang signifikan dari perlakuan terhadap panjang akar tanaman, perlakuan L3 menunjukkan hasil tertinggi dengan rerata panjang akar sebesar 29,16 cm, berbeda sangat nyata dengan perlakuan lain. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi pada perlakuan L3 memberikan lingkungan optimal bagi pertumbuhan sistem perakaran tanaman. Akar yang panjang umumnya menunjukkan kemampuan tanaman yang baik dalam mencari dan menyerap air serta unsur hara dari media tanam (Taiz et al., 2015).

Perlakuan L1, L2, dan L4 dengan rerata panjang akar berturut-turut 22,28 cm, 17,49 cm, dan 20,30 cm. Meskipun tidak sebaik L3, ketiga perlakuan ini masih mendukung perkembangan akar secara moderat. Akar yang cukup panjang mencerminkan aktivitas fisiologis tanaman yang masih berjalan optimal, seperti perkembangan meristem akar, perpanjangan sel, serta adaptasi terhadap kondisi lingkungan media. Menurut Kholová et al. (2013), pertumbuhan akar dipengaruhi

oleh ketersediaan air dan ruang pori dalam media tanam, yang memungkinkan pertukaran gas dan penyerapan nutrisi secara efisien.

Sementara itu, L6 memiliki rerata panjang akar 14,80 cm, yang berada dan L5 menunjukkan hasil paling rendah yaitu 3,33 cm. Panjang akar yang pendek pada L5 menunjukkan bahwa kondisi lingkungan sangat membatasi perkembangan akar, kemungkinan akibat faktor stres seperti kelembaban rendah, kepadatan media yang tinggi, atau kekurangan nutrisi makro. Menurut Brady & Weil (2008), kondisi lingkungan yang tidak mendukung dapat menghambat elongasi akar dan menyebabkan sistem perakaran berkembang secara minimal, sehingga mempengaruhi pertumbuhan keseluruhan tanaman.

Perbedaan adaptasi tanaman terhadap perlakuan yang diberikan, baik dari sisi fisik media tanam maupun ketersediaan nutrisi. Perkembangan akar yang optimal sangat penting karena akar merupakan organ vital yang tidak hanya berfungsi dalam penyerapan air dan hara, tetapi juga dalam mendukung kestabilan tanaman dan hubungan simbiotik dengan mikroorganisme tanah (Marschner, 2012).

5.15 Berat Kering Akar (gram)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pada perlakuan media tanah bekas tambang nikel dengan bahan organik dan pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap berat kering tanaman tembakau. Dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 11. Rerata berat kering akar tanaman

L	P			rata-rata	NP. Tukey α0.05
	P1	P2	P3		
L1	0,59	0,57	0,52	0,56ab	0,3
L2	0,60	0,46	0,58	0,55ab	
L3	0,50	0,26	0,50	0,42bc	
L4	0,80	0,52	0,68	0,67a	
L5	0,03	0,10	0,24	0,12d	
L6	0,55	0,30	0,39	0,42bc	

rata-rata	0,51	0,37	0,48
NP. Tukey *α0.05*	0,16		

Berdasarkan Tabel 11, mengenai rerata berat kering akar tanaman, diketahui bahwa perlakuan yang diberikan berpengaruh signifikan terhadap berat kering akar, Perlakuan L4 menunjukkan rerata tertinggi yaitu 0,67 gram, menandakan bahwa kondisi lingkungan pada perlakuan tersebut paling mendukung akumulasi biomassa akar. Berat kering akar mencerminkan hasil akhir pertumbuhan akar yang berhasil, serta efisiensi tanaman dalam menyerap dan mengalokasikan nutrisi ke jaringan akar (Taiz et al., 2015).

Perlakuan L1 dan L2 dengan rerata berat kering akar masing-masing 0,56 gram dan 0,55 gram. Nilai ini menunjukkan bahwa kedua perlakuan mampu mendukung pertumbuhan akar secara relatif baik, meskipun tidak setinggi L4. Pertumbuhan akar yang optimal dalam kondisi ini mungkin disebabkan oleh ketersediaan unsur hara yang cukup dan struktur media tanam yang mendukung respirasi akar. Sebagaimana dijelaskan oleh Marschner (2012), kondisi aerasi tanah dan tingkat ketersediaan nitrogen serta fosfor sangat berpengaruh terhadap pembentukan jaringan akar tanaman.

Berat kering akar terendah ditemukan pada perlakuan L5, yaitu hanya 0,12 gram, yang berbeda nyata dengan perlakuan lainnya. Menurut (Brady & Weil, 2008), hasil ini menunjukkan bahwa L5 merupakan kondisi paling tidak menguntungkan bagi pertumbuhan akar.

5.16 Kecepatan Berkecambah

Tabel 12. Data perkecambahan tanamana jagung

	Hari-1	Hari-2	Hari-3	Hari-4	Hari-5
Jumlah benih berkecambah	0	26	68	9	5

Rumus:

$$GSI = \frac{G1}{T1} + \frac{G2}{T2} + \frac{G3}{T3} + \frac{G4}{T4} + \frac{G5}{T5}$$

$$GSI = \frac{0}{1} + \frac{26}{2} + \frac{68}{3} + \frac{9}{4} + \frac{5}{5}$$

GSI = 0 + 13 + 22.67 + 2.25 +1
GSI = 38,92

Indeks Kecepatan Berkecambah (GSI) merupakan indikator penting untuk menilai vigor benih. Semakin tinggi nilai GSI, semakin cepat benih mampu berkecambah pada awal periode pengamatan. Nilai GSI sebesar 38,92 menunjukkan bahwa sebagian besar benih memiliki daya tumbuh yang baik dan mampu berkecambah dalam waktu relatif singkat, terutama pada hari ke-2 hingga hari ke-3.

Puncak perkecambahan terjadi pada hari ke-3, yang menandakan bahwa fase awal pertumbuhan berlangsung optimal pada waktu tersebut. Setelah hari ke-3, jumlah benih yang berkecambah mulai menurun (hari ke-4 sebanyak 9 benih dan hari ke-5 sebanyak 5 benih), yang berarti sebagian besar benih telah selesai berkecambah.

Hasil ini sejalan dengan pendapat Bewley & Black (2017) bahwa benih dengan vigor tinggi akan menunjukkan kecepatan berkecambah yang tinggi pada hari-hari awal pengamatan, sementara benih dengan vigor rendah cenderung terlambat berkecambah.

5.17 Waktu Rata-Rata Berkecambah (Hari)

Tabel 13. Waktu rata-rata berkecambah

No	Hari (t)	Jumlah berkecambah (n)	n x t
1	1	0	0
2	2	26	52
3	3	68	204
4	4	9	36
5	5	5	25
Total		**108**	**317**

Rumus:

$$\sum (n \times t) \qquad 317$$

$$MGT = \frac{}{\sum n} = \frac{}{108} = 2.94$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai **MGT sebesar 2,94 hari**, yang berarti rata-rata waktu yang dibutuhkan benih untuk berkecambah adalah sekitar 3 hari setelah tanam. Nilai MGT yang rendah menandakan bahwa sebagian besar benih berkecambah lebih awal, sehingga proses perkecambahan berlangsung cepat dan relatif seragam.

Distribusi jumlah benih yang berkecambah memperlihatkan bahwa puncak perkecambahan terjadi pada hari ke-3 dengan jumlah 68 benih, sedangkan pada hari-hari berikutnya jumlah benih yang berkecambah semakin menurun (hari ke-4 sebanyak 9 benih dan hari ke-5 sebanyak 5 benih). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar benih memiliki vigor tinggi, karena mampu berkecambah hampir bersamaan dalam periode awal pengamatan.

Menurut Bewley & Black (2017), nilai MGT yang rendah biasanya dikaitkan dengan vigor benih yang baik, karena perkecambahan cepat dan seragam akan mendukung pertumbuhan tanaman pada fase awal.

Nilai MGT sebesar 2,94 hari pada percobaan ini mengindikasikan bahwa benih yang digunakan memiliki viabilitas dan vigor yang baik, karena mampu berkecambah dalam waktu relatif singkat dengan pola yang seragam.

5.1.8 Persentase Perkecambahan (%)

Hasil perhitungan persentase perkecambahan (GP) menunjukkan bahwa dari total 108 benih yang diuji, seluruhnya mampu berkecambah sehingga diperoleh nilai **GP = 100%**. Nilai ini menandakan bahwa viabilitas benih sangat tinggi karena semua benih yang ditanam berhasil berkecambah selama periode pengamatan.

Rumus:

$$GP = \frac{\text{Jumlah benih yang berkecambah}}{\text{Jumlah total benih}} \text{ X } 100\%$$

$$GP = \frac{108}{108} \text{ X } 100\%$$

$GP = 100\%$

Persentase perkecambahan merupakan salah satu indikator utama dalam menilai kualitas fisiologis benih. Nilai GP yang tinggi, terutama mencapai 100%, mencerminkan bahwa benih memiliki daya hidup optimal dan mampu beradaptasi dengan baik terhadap kondisi lingkungan tempat pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa benih yang digunakan memiliki mutu genetik maupun fisiologis yang baik, serta proses penyimpanan atau perlakuan awal terhadap benih tidak menurunkan kualitasnya.

Menurut Copeland & McDonald (2012), persentase perkecambahan ≥ 80% umumnya sudah dianggap baik dan memenuhi standar untuk digunakan dalam kegiatan budidaya maupun penelitian.

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kandungan logam berat nikel (Ni) pada tanah bekas tambang mengalami penurunan setelah perlakuan bioremediasi. Sebelum perlakuan, kandungan Ni sangat tinggi yaitu 8,06 mg/kg (Top Soil), 23,54 mg/kg (Morowali), dan 56,74 mg/kg (Sorowako). Setelah bioremediasi, beberapa sampel menurun signifikan hingga berada dalam batas aman FAO/WHO (≤10 mg/kg), misalnya L2 (3,65 mg/kg) dan L6 (8,22 mg/kg).
2. Bahan organik dan pupuk hayati terbaik untuk bioremediasi adalah kombinasi biochar dengan mikroba (PGPR dan Pleorotus). Perlakuan ini terbukti mampu meningkatkan kandungan nitrogen dari 0,15–0,17% menjadi hingga 0,87%, fosfor dari 0,02–0,14% menjadi hingga 2,02%, serta kalium dari 0–0,8% menjadi hingga 0,92%, sekaligus menurunkan kandungan logam berat lebih optimal dibanding pupuk tunggal.
3. pH tanah menunjukkan peningkatan yang nyata setelah bioremediasi. Kondisi awal pH tanah pada Morowali tergolong masam (5,03–6,45) dan Sorowako netral–basa (6,91–7,67). Setelah bioremediasi, pH meningkat menjadi alkalis (8,00–8,95 H_2O dan 6,82–8,02 KCl), sehingga lebih mendukung proses perkecambahan benih jagung pada tanah bekas tambang nikel.
4. Indeks Kecepatan Berkecambah (GSI) sebesar 38,92, Waktu Rata-rata Berkecambah (MGT) sebesar 2,94 hari, dan Persentase Perkecambahan (GP) sebesar 100%. Benih yang diuji memiliki kualitas fisiologis tinggi dengan daya hidup, kecepatan, serta keseragaman perkecambahan yang optimal sehingga layak digunakan untuk mendukung pertumbuhan tanaman pada fase selanjutnya.

6.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, saran penelitian yaitu perlu dilakukan bioremediasi lanjutan secara berkelanjutan pada tanah bekas tambang nikel, terutama pada lokasi dengan kandungan Ni yang masih tinggi (>20 mg/kg), agar kadar logam berat dapat ditekan hingga batas aman untuk aktivitas pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

Agustrina, L. (2008). Perkecambahan tanaman dan faktor yang mempengaruhinya. Universitas Lampung.

Alloway, B. J. (2019). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Pearson.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2020). Elements of the Nature and Properties of Soils (5th ed.). Pearson.

Chen, J., Liu, Y., & Li, W. (2016). Phosphorus availability and microbial community in soil after biofertilizer application. Applied Soil Ecology, 108, 151–159.

Chen, Y., Li, H., & Zhou, Q. (2020). Toxicity of nickel in soils and its impact on plant physiology. Environmental Pollution, 263, 114–127.

Chen, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2021). Microbial processes in soil nitrogen transformation and availability. Soil Biology & Biochemistry, 155, 108–122.

Fauziyah, N., Sutanto, A., & Hidayat, T. (2021). Perbaikan kualitas tanah melalui bioremediasi dengan bahan organik. Jurnal Tanah dan Lingkungan, 23(2), 85–94.

Ferreira da Silva, J., Costa, A., & Ramos, J. (2022). Soil pH measurement: Comparison of H_2O and KCl methods. Soil Science Society of America Journal, 86(3), 455–465.

Gadd, G. M. (2020). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. Microbiology, 166(7), 614–654.

Hardjowigeno, S. (2020). Ilmu Tanah. Akademika Pressindo.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil Fertility and Fertilizers (8th ed.). Pearson.

Havlin, J. L., Beaton, J. D., & Tisdale, S. L. (2020). Soil Fertility and Fertilizers. Pearson.

Havlin, J. L., et al. (2021). Nutrient management in soils: Improving cation exchange capacity. Agronomy Journal, 113(4), 2031–2043.

Jain, P. K., et al. (2011). Bioremediation of toxic heavy metals using microbes. International Journal of Environmental Sciences, 1(6), 1109–1124.

Kalay, Z., dkk. (2019). Analisis agronomi jagung manis (Zea mays L.) sebagai komoditi hortikultura. Jurnal Agroteknologi, 11(2), 95–104.

Mashud, M., & Manaroinsong, E. (2014). Karakteristik tanah bekas tambang nikel dan strategi reklamasi. Buletin Sumber Daya Geologi, 9(2), 77–88.

Marschner, P. (2021). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (4th ed.). Academic Press.

Mosley, L. (2024). Soil acidity measurement and interpretation. Soil Research, 62(1), 45–56.

Muness, G., & Mulugeta, A. (2014). Role of PGPR in improving plant growth and soil fertility. Journal of Agricultural Science, 6(7), 123–135.

Nguyen, T., Rahman, A., & Lee, J. (2023). Early vegetative growth of maize under different soil conditions. Plant Growth Regulation, 102(3), 543–555.

Nurhidayah, R. (2011). Budidaya Jagung Manis. Balai Penelitian Tanaman Serealia.

Nurulita, T., et al. (2022). Bioremediasi tanah tercemar menggunakan biochar dan mikroorganisme lokal. Jurnal Tanah Tropika, 27(1), 15–25.

Quintella, C. M., Mata, A. M., & Lima, L. C. (2019). Overview of bioremediation with microorganisms. Critical Reviews in Biotechnology, 39(8), 1084–1102.

Rahman, A., et al. (2022). Influence of soil fertility on maize leaf development. Journal of Plant Nutrition, 45(9), 1354–1367.

Rahmi, A., Syarif, A., & Hidayat, R. (2023). Analisis tekstur tanah dan implikasi terhadap kesuburan. Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan, 25(1), 12–20.

Rieuwerts, J. (2021). The mobility and bioavailability of trace metals in soils as a function of pH. Chemosphere, 285, 131–143.

Savei, L. (2012). Degradasi kesuburan tanah tropis dan strategi perbaikannya. Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 17(2), 87–94.

Singh, B., et al. (2019). Phosphorus solubilization in soils: The role of microorganisms. Agronomy, 9(3), 120–131.

Singh, H., et al. (2022). Potassium availability and microbial mobilization in soil. Soil Systems, 6(2), 23–35.

Singh, R., et al. (2023). Soil nitrogen dynamics and its availability to plants. Soil Biology & Biochemistry, 165, 108–126.

Scoma, A., et al. (2016). Bioremediation approaches for contaminated soils. Applied Microbiology and Biotechnology, 100(21), 8933–8948.

Subardja, D., et al. (2021). Analisis tekstur tanah dan implikasi kesuburan lahan. Jurnal Tanah dan Iklim, 45(1), 1–10.

Sudirman, A., et al. (2022). Klasifikasi kapasitas tukar kation (KTK) tanah untuk evaluasi kesuburan. Jurnal Sumberdaya Lahan, 16(2), 77–84.

Sun, H., et al. (2022). Biochar application improves soil pH and nutrient availability: A global meta-analysis. Science of the Total Environment, 806, 150–162.

Sutanto, R. (2020). Pertanian Organik: Menuju Pertanian Alternatif dan Berkelanjutan. Kanisius.

WHO. (2021). Permissible limits for heavy metals in soil and crops. World Health Organization.

Wijayanti, D., & Permana, A. (2023). Perbaikan tekstur dan kualitas tanah dengan bahan organik. Jurnal Pertanian Berkelanjutan, 18(2), 55–64.

Zhang, Y., et al. (2023). Bioremediation improves soil fertility and crop productivity. Environmental Research, 222, 115–128.