TA/TL/2026/2134

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Potensi Kombinasi *Kompos, Nano Biochar,* dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)* terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo

Sheila Aprilia Putri
21513100

Dosen Pembimbing I : Dewi Wulandari, S.Hut., M.gr., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Desain Inovasi
Universitas Islam Indonesia
2026

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Potential of a Combination of Compost, Nanobiochar, and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Soil Quality and Growth of *Melaleuca Cajuputi* in Soil from an Artisanal Gold Mining Area in Kulon Progo

Sheila Aprilia Putri
22513100

Supervisor 1: Dewi Wulandari, S.Hut., M.gr., Ph.D.
Supervisor 2 : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Innovation Design Engineering
Universitas Islam Indonesia
2026

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Potensi Kombinasi *Kompos*, *Nano Biochar*, dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)* terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Desain Inovasi Universitas Islam Indonesia.

Sheila Aprilia Putri

22513100

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 27 Agustus 2026 dan disetujui oleh:

Dewi Wulandari, S.Hut., M.gr., Ph.D. (Pembimbing 1)

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)

Dr.Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. (Penguji)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI YOGYAKARTA

31-8-26

Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan *(artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
   a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
   b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

   Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 30 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Shena Aprilia Putri

22513100

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah Swt. atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Potensi Kombinasi Kompos, Nano Biochar, dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan *Melaleuca cajuputi* pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo." Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah Swt. atas segala rahmat, kesehatan, dan kemudahan yang diberikan selama penyusunan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua dan keluarga atas doa, dukungan, dan motivasi yang tiada henti.
3. Bapak/Ibu Dosen Pembimbing serta seluruh dosen Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia atas bimbingan dan ilmu yang telah diberikan.
4. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Sleman, 30 Juli 2026



Sheila Aprilia Putri

Potensi Kombinasi *Kompos, Nano Biochar,* dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)* terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo

Mahasiswa	: Sheila Aprilia Putri
NIM	: 22513100
Program Studi	: Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing I	: Dewi Wulandari, S.Hut., M.gr., Ph.D.
Pembimbing II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Kegiatan penambangan emas rakyat berpotensi menurunkan kualitas tanah akibat pencemaran merkuri (Hg), rendahnya pH, dan terbatasnya ketersediaan unsur hara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi kompos, nano biochar, dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap kualitas tanah dan pertumbuhan *Melaleuca cajuputi* pada tanah bekas tambang emas rakyat di Kulon Progo. Penelitian dilakukan selama 18 minggu dengan tiga perlakuan, yaitu S+C, S+C+NB, dan S+C+NB+PGPR. Parameter yang diamati meliputi pH, fosfor (P), Hg, dan pertumbuhan tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nano biochar meningkatkan pH tanah dari 4,25 pada S+C menjadi 4,72 pada S+C+NB dan meningkatkan P_2O_5 tersedia menjadi 32,11 mg/100g, tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Kandungan Hg total tanah pada S+C+NB sebesar 137,40 mg/kg lebih rendah dibandingkan S+C+NB+PGPR sebesar 156,83 mg/kg. Sementara itu, S+C+NB+PGPR menghasilkan pertumbuhan terbaik dengan tinggi, diameter, dan biomassa tanaman tertinggi. Dengan demikian, S+C+NB lebih berpotensi dalam mendukung perbaikan kualitas tanah, sedangkan penambahan PGPR lebih berperan dalam meningkatkan pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*.

Kata kunci: kompos, *Melaleuca cajuputi*, merkuri, nanobiochar, PGPR.

Potential of a Combination of Compost, Nanobiochar, and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Soil Quality and Growth of *Melaleuca Cajuputi* in Soil from an Artisanal Gold Mining Area in Kulon Progo

Student	: Sheila Aprilia Putri
Student Number	: 22513100
Study Program	: Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor I	: Dewi Wulandari, S.Hut., M.gr., Ph.D.
Supervisor II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Artisanal gold mining can reduce soil quality due to mercury (Hg) contamination, low soil pH, and limited nutrient availability. This study aimed to analyze the effects of compost, nano biochar, and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) on soil quality and the growth of *Melaleuca cajuputi* in artisanal gold post-mining soil in Kulon Progo. The study was conducted for 18 weeks using three treatments: S+C, S+C+NB, and S+C+NB+PGPR. The observed parameters included soil pH, phosphorus (P), Hg, and plant growth. The results showed that nano biochar increased soil pH from 4.25 in S+C to 4.72 in S+C+NB and increased available P_2O_5 to 32.11 mg/100g, the highest among the treatments. Total soil Hg in S+C+NB was 137.40 mg/kg, lower than that in S+C+NB+PGPR (156.83 mg/kg). Meanwhile, S+C+NB+PGPR produced the best plant growth, with the highest plant height, stem diameter, and biomass. Therefore, S+C+NB showed greater potential for improving soil quality, while the addition of PGPR contributed more to promoting the growth of *Melaleuca cajuputi*.

Key words: compost, mercury, *Melaleuca cajuputi*, nanobiochar, Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR).

DAFTAR ISI

PRAKATA i
Abstrak ii
DAFTAR ISI iv
DAFTAR TABEL vi
DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR LAMPIRAN i
BAB I PENDAHULUAN 2
1.1 Latar Belakang 2
1.2 Perumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 5
1.4 Manfaat Penelitian 5
1.5 Ruang Lingkup 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Tambang Emas Rakyat dan Dampak Lingkungannya 6
2.2 Logam Berat pada Tanah Bekas Tambang Emas 7
2.3 Remediasi Tanah Bekas Tambang 7
2.4. Kompos sebagai bahan pembenah tanah 8
2.5. Nano Biochar 8
BAB III METODE PENELITIAN 18
3.1. Waktu dan Lokasi 18
3.2 Alat dan Bahan 18
3.3 Diagram Alir Penelitian 23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 34
4.1. Potensi Bahan Pembenah terhadap Kandungan pH Tanah 34
4.2. Potensi Bahan Pembenah terhadap Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg) Tanah dan Tanaman Melaleuca cajuputi 36
4.2.1. Kadar Merkuri (Hg) pada Tanah 36

4.2.2. Kadar Merkuri (Hg) pada Akar 39
4.2.3. Kadar Merkuri (Hg) pada Batang 41
4.3. Potensi Bahan Pembenah terhadap Kandungan Nutrisi Fosfor (P_2O_5) Tanah dan Tanaman 44
4.3.1. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Tanah 44
4.3.2. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Akar 46
4.3.3. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Batang 48
4.4. Potensi Bahan Pembenah Tanah terhadap Pertumbuhan Tanaman *Melaleuca cajuputi* 50
4.4.1. Tinggi Tanaman 50
4.4.2. Diameter Tanaman 52
4.4.3. Biomassa Batang dan Akar 55
4.5. Analisis Efisiensi Penggunaan Bahan Pembenan Tanah 58
BAB V PENUTUP 60
5.1 Kesimpulan 60
5.2 Saran 60
DAFTAR PUSTAKA 61
LAMPIRAN 66
Lampiran 66
RIWAYAT HIDUP 1

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 *Penelitian Terdahulu* 14
Tabel 3. 1 *Alat* 19
Tabel 3. 2 *Bahan* 20

DAFTAR GAMBAR

gambar 2. 1. Grafik XRD 21
gambar 2. 2 Data XRD 21
Gambar 3. 1 *Diagram Alir Penelitian* 23
Gambar 3. 2. *Peta Lokasi Sampling* 25
Gambar 3. 3 *Persiapan Media Tanam* 26
Gambar 3. 4 *Penanaman Bibit* 27
Gambar 3. 5 *Pengukuran Diameter* 28
Gambar 3. 6 Pemanenan Tanaman 29
Gambar 3. 7 *Pembacaan Spektrofotometer* 30
Gambar 3. 8 *Pembacaan Uji Hg (ICP)* 31
Gambar 4. 1. Grafik pH tanah 35
Gambar 4. 2. Kadar Merkuri (Hg) pada Tanah 37
Gambar 4. 3. Grafik Kadar Merkuri (Hg) pada Akar 39
Gambar 4. 4. Grafik Kadar Merkuri (Hg) Batang 42
Gambar 4. 8. Grafik Tinggi Tanaman 50
Gambar 4. 9. Diameter Tanaman 53
Gambar 4. 10. Grafik biomassa tanaman 56

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.Dokumentasi Persiapan tanah 66
Lampiran 2 Dokumentasi Tanaman..... 66
Lampiran 3 Dokumentasi Pengukuran..... 67
Lampiran 4 Dokumentasi Pemanenan 67
Lampiran 5..... 68
Lampiran 6..... 68
Lampiran 7 XRD..... 70

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki berbagai sumber daya mineral, termasuk emas, perak, dan tembaga yang tersebar di berbagai wilayah. Potensi tersebut mendorong kegiatan eksplorasi dan pemanfaatan sumber daya mineral melalui aktivitas pertambangan. Salah satu kegiatan yang berkembang di sejumlah daerah adalah pertambangan emas rakyat yang dilakukan dalam skala individu, kelompok, maupun keluarga. Namun, pelaksanaannya sering kali belum didukung oleh prosedur teknis dan pengelolaan lingkungan yang memadai (Salim, 2005; Hentschel et al., 2002).

Salah satu wilayah yang memiliki aktivitas pertambangan emas rakyat adalah Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Aktivitas pertambangan emas tradisional di wilayah tersebut telah berlangsung sejak tahun 1991 (Strategi et al., 2020). Dalam proses pengolahan bijih, metode algamasi digunakan untuk memisahkan emas dengan memanfaatkan merkuri (Hg). Aktivitas tersebut termasuk dalam kegiatan pertambangan tanpa izin (PETI/PESK) dan berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila residu hasil pengolahan tidak dikelola dengan baik. Penggunaan metode algamasi pada pertambangan emas rakyat berkaitan dengan ketersediaan merkuri yang relatif mudah diperoleh serta pengawasan penggunaannya yang masih terbatas (Larasati et al., 2012). Pengolahan emas yang dilakukan di sekitar lokasi pertambangan tanpa sistem pengelolaan limbah yang memadai dapat menyebabkan residu merkuri masuk ke lingkungan. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan pencemaran pada tanah dan air di sekitar area pertambangan.

Merkuri merupakan logam berat yang bersifat toksik dan sulit terdegradasi secara alami, sehingga keberadaannya di lingkungan dapat menimbulkan risiko bagi organisme. Paparan merkuri dapat mengganggu aktivitas enzim dan proses metabolisme organisme serta menyebabkan kerusakan organ pada tingkat paparan tertentu (Triadriani, 2014). Pada manusia, paparan merkuri juga diketahui berkaitan dengan gangguan pada ginjal dan sistem saraf (Pratiwi, 2020).

Permasalahan pada tanah pascatambang tidak hanya berkaitan dengan keberadaan logam berat, tetapi juga dengan kondisi fisik dan kimia tanah yang kurang mendukung pertumbuhan tanaman. Tanah bekas PETI umumnya memiliki tekstur berpasir, kemampuan menahan air yang rendah, serta kandungan bahan organik dan unsur hara yang terbatas (Hendrianto et al., 2019; Romadhan et al., 2022). Kondisi tersebut dapat membatasi kemampuan tanah dalam menyediakan lingkungan tumbuh yang sesuai bagi tanaman. Selain itu, residu merkuri yang masih terdapat dalam tanah dapat terserap oleh akar dan mengganggu proses fisiologis tanaman (Hamzah & Priyadarshni, 2019; Chen & Yeng, 2012).

Permasalahan tersebut dapat diperburuk oleh kondisi kimia tanah yang kurang mendukung, seperti pH yang rendah, kapasitas tukar kation (KTK) yang rendah, serta keterbatasan unsur hara makro dan mikro (Allo, 2016). Dengan karakteristik tersebut, tanah pascatambang memerlukan perbaikan terlebih dahulu sebelum dapat dimanfaatkan sebagai media tumbuh. Pendekatan berbasis bahan organik telah dilaporkan mampu memperbaiki kualitas tanah sekaligus menurunkan kadar merkuri pada tanah dan jaringan tanaman (Nuriman et al., 2025). Oleh karena itu, pendekatan serupa memiliki potensi untuk diterapkan pada tanah bekas tambang emas rakyat di Kulon Progo.

Salah satu bahan yang berpotensi digunakan dalam perbaikan tanah tercemar adalah nano biochar, yaitu biochar berukuran nanometer dengan kisaran ukuran sekitar 1–100 nm. Ukuran partikel yang lebih kecil memberikan karakteristik permukaan yang berbeda sehingga nano biochar berpotensi berinteraksi dengan berbagai jenis polutan di lingkungan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa nano biochar dapat membantu mengikat polutan, termasuk logam berat, pada media tanah maupun air (Naghdi et al., 2017a; Sulaiman et al., 2013; Zhang et al., 2022b). Selain itu, kompos dapat digunakan sebagai sumber bahan organik dan unsur hara yang mendukung perbaikan kondisi tanah serta produktivitas tanaman (Ch'ng et al., 2014).

Perbaikan tanah juga dapat didukung oleh aktivitas mikroorganisme, salah satunya melalui *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR). Kelompok bakteri ini berasosiasi dengan daerah perakaran dan dapat memberikan manfaat terhadap pertumbuhan tanaman. PGPR juga berpotensi berperan dalam proses

bioremediasi melalui interaksinya dengan polutan, termasuk logam berat dan senyawa pencemar lainnya (Nabila, 2025). Pemanfaatan mikroorganisme tersebut dapat menjadi salah satu pendekatan biologis dalam mendukung pemulihan lingkungan tercemar (Nabila, 2025).

Perbaikan kondisi tanah pascatambang perlu disertai dengan pemilihan tanaman yang mampu beradaptasi pada kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. *Melaleuca cajuputi* atau kayu putih merupakan salah satu tanaman yang memiliki kemampuan adaptasi terhadap kondisi ekstrem, termasuk tanah yang kurang subur dan bersifat masam (Agoes, 2010). Penggunaan tanaman adaptif yang dikombinasikan dengan ameliorasi dan penambahan bahan organik dapat mendukung proses pemulihan kesuburan tanah pada lahan reklamasi (Ruth & Wani, 2017).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi penggunaan kombinasi kompos, nano biochar, dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) pada tanah bekas tambang emas rakyat di Kulon Progo. Evaluasi dilakukan melalui pengamatan terhadap perubahan kualitas tanah dan respons pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*. Parameter kualitas tanah yang dianalisis meliputi pH, fosfor (P), dan merkuri (Hg), sedangkan pertumbuhan tanaman dievaluasi melalui parameter pertumbuhan yang telah ditentukan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai potensi penggunaan bahan pembenah tersebut dalam mendukung perbaikan kondisi tanah dan pertumbuhan tanaman pada lahan bekas tambang emas rakyat.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh kombinasi nano biochar, kompos dan PGPR terhadap parameter pH, Hg dan P pada tanah pascatambang emas tradisional di Kulon Progo?
2. Bagaimana pengaruh kombinasi nano biochar, kompos dan PGPR terhadap parameter pertumbuhan tanaman kayu putih *(Melaleuca Cajuputi)* yang tumbuh pada tanah pascatambang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh kombinasi nano biochar, kompos dan PGPR terhadap parameter pH, Hg dan P pada kualitas tanah pascatambang,
2. Menganalisa parameter pertumbuhan tanaman kayu putih *(Melaleuca Cajuputi)* pada media tanah bekas tambang emas.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan pemahaman terkait pengaruh kombinasi nano biochar, kompos dan PGPR terhadap parameter pH, Hg, P dan pertumbuhan tanaman kayu putih *(Melaleuca Cajuputi)* pada media tanah bekas tambang emas,
2. Memberikan manfaat teoritis berupa ilmu pengetahuan di bidang ilmu tanah terkait kombinasi nano biochar, kompos dan PGPR terhadap parameter pH, Hg, P dan pertumbuhan tanaman kayu putih *(Melaleuca Cajuputi)* pada media tanah bekas tambang emas.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini terkait kombinasi nano biochar, kompos dan PGPR terhadap terhadap parameter pH, Hg, P, dan pertumbuhan tanaman kayu putih *(Melaleuca Cajuputi)* pada tanah pascatambang emas tradisional
2. Jenis tanaman yang digunakan yaitu *Melaleuca Cajuputi*
3. Penelitian di mulai dari Bulan April 2026 hingga September 2026
4. Pemantauan pertumbuhan tanaman dilakukan dalam skala rumah

.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tambang Emas Rakyat dan Dampak Lingkungannya

Penambangan emas skala kecil (PESK) merupakan salah satu aktivitas ekonomi yang dilakukan oleh masyarakat, terutama di wilayah pedesaan. Indonesia memiliki potensi sumber daya mineral yang cukup besar, termasuk emas (Sari, 2022). Berdasarkan KLHK (2017), PESK mencakup kegiatan penambangan yang dilakukan oleh individu atau kelompok usaha dengan skala modal dan kapasitas produksi yang relatif kecil. Kegiatan ini memiliki peran ekonomi bagi masyarakat karena dapat menjadi salah satu sumber mata pencaharian dan membuka kesempatan kerja (Purwato, 2021). Namun, proses pengolahan emas pada kegiatan PESK masih banyak menggunakan metode algamasi yang melibatkan merkuri (Hg), sehingga berpotensi menimbulkan dampak terhadap lingkungan.

Pengolahan bijih emas pada PESK umumnya dilakukan melalui proses algamasi, yaitu dengan mencampurkan bijih dengan merkuri untuk membantu memisahkan emas dari material lainnya. Penggunaan merkuri yang telah berlangsung dalam praktik pertambangan tersebut dapat meningkatkan risiko pencemaran apabila residu hasil pengolahan tidak dikelola dengan baik (Kusuma et al., 2017; Indra, 2022). Dampak kegiatan pertambangan tidak hanya berkaitan dengan pencemaran lingkungan, tetapi juga dapat memengaruhi kondisi sosial dan ekonomi masyarakat di sekitar wilayah tambang.

Aktivitas PESK dapat memberikan manfaat ekonomi melalui peningkatan kesempatan kerja dan pendapatan masyarakat. Namun, kegiatan tersebut juga dapat menimbulkan tekanan terhadap lingkungan, terutama apabila pengelolaan limbah belum dilakukan secara memadai. Dampak yang dapat muncul antara lain penurunan kualitas tanah dan air, perubahan kondisi lahan, serta keberadaan merkuri pada tanaman di sekitar area pertambangan (Hidayah, 2016 didalam; Sari, 2022). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa manfaat ekonomi dari kegiatan pertambangan perlu diimbangi dengan pengelolaan lingkungan agar dampak pencemaran dapat dikendalikan.

2.2 Logam Berat pada Tanah Bekas Tambang Emas

Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, merupakan salah satu wilayah di Daerah Istimewa Yogyakarta yang memiliki aktivitas pertambangan emas skala kecil. Kegiatan tersebut memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat melalui peningkatan pendapatan dan kesempatan kerja, tetapi aspek pengelolaan lingkungan masih menjadi perhatian. Aktivitas pertambangan yang tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan perubahan kondisi lahan, termasuk meningkatkan risiko pergerakan massa tanah dan batuan (Santos et al., 2018).

Pada proses pengolahan emas secara algamasi, merkuri digunakan untuk membantu memisahkan emas dari bijih. Residu dari proses tersebut berpotensi tertinggal pada lingkungan dan menyebabkan pencemaran tanah. Selain Hg, kegiatan pengolahan hasil tambang juga dapat berkaitan dengan keberadaan logam berat lain seperti Pb, Cd, dan As yang memiliki sifat toksik (Tawakal, 2025). Keberadaan kontaminan tersebut dapat memengaruhi kualitas tanah, termasuk kondisi kemasaman dan karakteristik fisik tanah.

2.3 Remediasi Tanah Bekas Tambang

Remediasi tanah merupakan upaya untuk menangani tanah yang telah tercemar dengan tujuan mengurangi keberadaan kontaminan dan mengendalikan risikonya terhadap lingkungan maupun manusia. Pendekatan remediasi dapat dilakukan melalui metode fisik, kimia, atau biologis, bergantung pada jenis kontaminan dan karakteristik tanah yang ditangani. Pada tanah bekas tambang, kondisi fisik dan kimia yang telah mengalami perubahan dapat menjadi faktor pembatas bagi pertumbuhan tanaman (Arifin et al., 2018).

Aktivitas pertambangan dapat menyebabkan perubahan pada karakteristik tanah, seperti pemadatan, penurunan permeabilitas dan porositas, serta berkurangnya kemampuan tanah dalam menahan air (Edache & Mallo, 2019). Ketersediaan unsur hara seperti nitrogen, kalium, dan fosfat juga dapat menjadi terbatas pada tanah bekas tambang (Subowo, 2011). Hilangnya lapisan tanah atas semakin memperburuk kondisi tersebut karena lapisan ini merupakan bagian tanah yang relatif kaya bahan organik dan unsur hara. Oleh sebab itu, pemulihan tanah pascatambang perlu diarahkan pada perbaikan sifat tanah sekaligus pemulihan fungsi ekologisnya.

Pemulihan tanah dapat didukung melalui pendekatan biologis dengan memanfaatkan mikroorganisme yang mampu beradaptasi pada kondisi tanah terdegradasi. Mikroorganisme tersebut dapat membantu memperbaiki ketersediaan unsur hara dan mendukung perkembangan tanaman. Pemanfaatan vegetasi yang sesuai dengan kondisi lahan juga menjadi bagian penting dalam proses pemulihan karena tanaman dapat membantu membangun kembali fungsi ekologis tanah (Mashudi & Nisa, 2023).

Bioremediasi dan fitoremediasi merupakan pendekatan biologis yang dapat digunakan dalam penanganan tanah tercemar. Kedua pendekatan tersebut memanfaatkan aktivitas organisme untuk mengurangi risiko kontaminan di lingkungan. Dibandingkan dengan metode fisik dan kimia, pendekatan biologis dapat menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan, meskipun prosesnya dapat membutuhkan waktu yang lebih panjang (Ernitha & Lamria, 2018).

2.4. Kompos sebagai bahan pembenah tanah

Kompos merupakan bahan organik yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk sekaligus pembenah tanah. Penambahan kompos dapat memberikan perubahan pada sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga kondisi media tumbuh menjadi lebih mendukung bagi tanaman. Kompos juga memiliki kemampuan dalam membantu meningkatkan retensi air tanah. Kompos yang telah matang umumnya ditandai dengan aroma yang tidak menyengat, warna yang menyerupai tanah, kadar air yang relatif rendah, serta suhu yang mendekati suhu lingkungan (Frissilia & Nopi, 2022).

2.5. Nano Biochar

Nano biochar merupakan bahan berbasis biochar yang memiliki ukuran partikel pada skala nanometer. Ukuran partikel yang lebih kecil dapat menyebabkan peningkatan luas permukaan spesifik, porositas, serta situs aktif dan gugus fungsi pada permukaan dibandingkan dengan biochar berukuran konvensional. Karakteristik tersebut memungkinkan nano biochar memiliki kemampuan interaksi yang lebih tinggi dengan berbagai komponen tanah dan kontaminan, termasuk logam berat. Oleh karena itu, nano biochar berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan pembenah pada tanah yang tercemar logam berat (Jiang Mengyuan et al., 2023).

Interaksi nano biochar dengan logam berat dapat berlangsung melalui beberapa mekanisme, seperti adsorpsi pada permukaan, pertukaran ion, pembentukan kompleks, dan presipitasi**.** Mekanisme tersebut dapat menyebabkan logam berat menjadi lebih terikat pada permukaan nano biochar maupun matriks tanah, sehingga pergerakan dan ketersediaannya bagi tanaman berpotensi menurun. Kemampuan nano biochar dalam mengikat logam berat tidak selalu sama, karena dipengaruhi oleh karakteristik tanah dan kontaminan, antara lain pH tanah, keberadaan ion lain, bahan organik terlarut, serta karakteristik logam yang terdapat dalam tanah (Jiang Mengyuan et al., 2023).

Selain berperan dalam interaksi dengan logam berat, nano biochar juga dapat memberikan pengaruh terhadap kondisi fisik dan kimia tanah. Struktur pori dan luas permukaan yang dimiliki nano biochar memungkinkan bahan tersebut berperan dalam meningkatkan retensi air dan kapasitas tukar kation (KTK) serta menyediakan permukaan yang dapat mendukung keberadaan mikroorganisme pada daerah rizosfer. Perubahan kondisi tanah tersebut dapat memengaruhi proses ketersediaan dan transformasi unsur hara serta menciptakan lingkungan yang lebih mendukung perkembangan tanaman. Dengan demikian, nano biochar berpotensi digunakan sebagai bahan pembenah untuk mendukung pertumbuhan tanaman pada tanah yang tercemar logam berat dan menunjang proses fitoremediasi (Jiang Mengyuan et al., 2023).

Penggunaan nano biochar pada tanah perlu mempertimbangkan dosis aplikasi, karakteristik bahan, tujuan penggunaan, dan kondisi media tanam**.** Dalam penelitian ini, nano biochar diberikan dengan dosis 0,5% dari bobot tanah. Pemilihan dosis tersebut didasarkan pada pertimbangan penggunaan dosis nano biochar yang telah dilaporkan dalam penelitian sebelumnya dan diharapkan dapat memberikan pengaruh terhadap perbaikan kondisi tanah (Joseph et al., 2020)

2.6. *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR)

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) merupakan kelompok bakteri yang berasosiasi dengan daerah perakaran dan dapat memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman. Pada tanah yang mengalami kontaminasi logam berat, keberadaan PGPR dapat membantu tanaman menghadapi kondisi cekaman

melalui dukungan terhadap perkembangan akar, penyerapan unsur hara, dan pengurangan dampak toksisitas logam (Sahoo Ritwik et al., 2024).

PGPR dapat mendukung pertumbuhan tanaman melalui beberapa mekanisme, seperti produksi fitohormon, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, dan produksi enzim ACC deaminase. Mikroorganisme ini juga dapat menghasilkan senyawa seperti siderofor dan asam organik yang memengaruhi ketersediaan logam di sekitar akar. Respons tersebut dapat membantu tanaman beradaptasi terhadap cekaman logam dan mendukung proses fitoremediasi (Sahoo Ritwik et al., 2024).

Selain mekanisme tersebut, PGPR dapat berinteraksi langsung dengan logam melalui proses biosorpsi, bioakumulasi, biotransformasi, dan presipitasi. Aktivitas mikroorganisme juga dapat mendukung sistem pertahanan tanaman terhadap stres oksidatif. Oleh karena itu, keberadaan PGPR berpotensi membantu tanaman mempertahankan pertumbuhan pada kondisi tanah yang terkontaminasi logam berat (Sahoo Ritwik et al., 2024).

2.7. *Melaleuca Cajuputi* (Tanaman Kayu Putih)

Melaleuca cajuputi atau kayu putih merupakan tanaman yang telah banyak dimanfaatkan dalam industri minyak atsiri dan memiliki potensi untuk mendukung rehabilitasi lahan marginal. Tanaman ini membutuhkan intensitas cahaya yang tinggi dan termasuk jenis tanaman dengan pertumbuhan relatif cepat. Kemampuannya untuk tumbuh pada tanah dengan tingkat kesuburan rendah menjadikan kayu putih berpotensi digunakan pada lahan yang mengalami degradasi (Afifah H, 2016).

2.8. Parameter Penelitian

2.8.1. pH tanah

pH tanah menunjukkan tingkat kemasaman atau kebasaan tanah yang berkaitan dengan konsentrasi ion hidrogen (H^+). Parameter ini penting dalam evaluasi kualitas tanah karena dapat memengaruhi ketersediaan unsur hara, aktivitas mikroorganisme, serta pertumbuhan tanaman. Kondisi pH yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi dapat menghambat ketersediaan dan penyerapan beberapa unsur hara. Pada tanah bekas tambang, perubahan pH dapat terjadi akibat perubahan komposisi mineral, hilangnya lapisan tanah atas, serta keberadaan

kontaminan. Oleh karena itu, pH dapat digunakan sebagai salah satu indikator untuk mengevaluasi perubahan kondisi tanah setelah pemberian bahan pembenah (Agegnehu et al., 2017).

Pemberian bahan amelioran seperti kompos dan biochar dapat digunakan untuk membantu memperbaiki pH tanah. Kompos berkontribusi melalui penambahan bahan organik, sedangkan biochar umumnya memiliki karakter basa yang dapat membantu meningkatkan pH tanah masam. Perubahan pH juga dapat memengaruhi ketersediaan unsur hara dan perilaku logam berat dalam tanah. Besarnya perubahan tersebut bergantung pada kondisi awal tanah, karakteristik bahan pembenah, serta dosis yang digunakan (Zhang et al., 2024; Agegnehu et al., 2017).

2.8.2. Merkuri (Hg)

Kebutuhan akan logam dasar dan logam mulia di Indonesia saat ini terus menunjukkan tren peningkatan. Kondisi tersebut mendorong semakin intensifnya kegiatan pemanfaatan sumber daya mineral, khususnya pada sektor logam dasar dan logam mulia (Kilian & Abdullah, 2018). Disisi lain, aktivitas pertambangan seringkali dipersepsikan oleh masyarakat sebagai faktor yang berkontribusi terhadap kerusakan serta pencemaran lingkungan. Salah satunya yaitu terdapat pada pertambangan emas skala kecil, di mana proses pengolahan bijih umumnya dilakukan dengan teknik algamasi yang memanfaatkan merkuri (Hg)sebagai bahan pengikat emas. Mengingat sifat merkuri yang berbahaya, penyebarannya perlu dikendalikan melalui pengawasan yang ketat agar langkah penanganan dapat dilakukan lebih awal dn tepat sasaran (Widagdo & Asmoro, 2015).

Teknik algamasi masih banyak diterapkan karena prosedurnya yang relatif mudah serta biaya operasionalnya yang lebih rendah dibandingkan metode lain (Alimano & Marsen, 2011). Namun merkuri dalam bentuk metil merkuri memiliki tingkat penyerapan yang sangat tinggi oleh organisme hidup, yaitu higga 95%. Apabila zat tersebut telah masuk ke dalam tubuh, dapat menimbulkan dampak serius berupa

kerusakan pada organ pencernaan, hati, limfa, ginjal, serta sistem saraf, yang pada akhirnya dapat menyebabkan gejala seperti mati rasa dan gangguan keseimbangan (Alimano & Darmutji, 2007).

Merkuri adalah logam berat yang masuk ke dala kategori Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) karena memiliki sifat beracun dan sulit terdegradasi di lingkungan, sehingga menimbulkan risiko bagi ekosistem maupun kesehatan manusia (MENLH, 2013). Dalam Undang – Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, khususnya pasal 69 menyatakan bahwa setiap orang membuang limbah B3 ke sungai. Pembuangan limbah tersebut ke sungai dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat, terutama bagi yang menggunakan air sungai sebagai sumber air minum serta untuk kebutuhan sehari-hari lainnya.

2.8.3. Fosfor (P) pada tanah

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara makro yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Unsur ini terlibat dalam berbagai proses metabolism, seperti pembentukan energi, pembelahan sel, perkembangan jaringan akar, serta sintesis senyawa penyusun materi genetic. Kecukupan fosfor akan membantu tanaman menyerap unsur hara secara lebih efisien sehingga pertumbuhan vegetative maupun generative dapat berlangsung dengan baik. Namun, tidak seluruh fosfor yang tedapat di dalam tanah dapat dimanfaatkan oleh tanaman karena Sebagian besar berada dalam bentuk yang sukar larut atau terikat oleh mineral tanah (Brady & Weil, 2017; Penn & Camberato, 2019)

Foafoe didalam tanah tersusun atas fraksi organic dan anorganik yang terus mengalami perubahan melalui berbagai proses kimia dan biologis. Fosfor organic umumnya berasal dari pelapukan sisa tanaman dan aktivitas mikroorganisme, sedangkan fosfor anorganik banyak dijumpai dalam bentuk ikatan dengan besi (Fe), alumunium (Al), maupun kalsium (Ca). pada tanah yang bersifat masam, fosfor lebih

mudah berikatan dengan Fe dan Al sehingga jumlah fosfor yang tersedia bagi tanaman menjadi lebih sedikit. Sebaliknya, Ketika kondisi tanah membaik, terutama dengan meningkatnya nilai pH, Sebagian fosfor akan lebih mudah berada dalam bentuk yang dapat diserap oleh akar tanaman (Penn & Camberato, 2019).

Selain di pengaruhi oleh pH tanah, ketersediaan fosfor juga berkaitan dengan keberadaan bahan organic dan aktivitas mikroorganisme di daerah perakaran. Penambahan kompos dapat meningkatkan kandungan bahan organic yang mampu berperan dalam proses mineralisasi fosfor, sedangkan biochar mampu memperbaiki sifat kimia tanah sehingga kehilangan fosfor akiat fiksasi dapat dikurangi. Di sisi lain, beberapa kelompok bakteri rizosfer, termasuk *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR), diketahui memiliki kemampuan melarutkan senyawa fosfat yang sulit larut menjadi bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman. Oleh karena itu, penggunaan kompos, biochar, dan PGPR secara bersamaan berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan fosfor pada tanah yang mengalami degradasi (Ojuederie & Babalola, 2017; Penn & Camberato, 2019).

2.8.4. Pertumbuhan Tanaman (*Melaleuca Cajuputi)*

Parameter pertumbuhan tanaman yang diamati dalam penelitian ini meliputi tinggi tanaman, diameter batang *Melaleuca Cajuputi*. Kategori tersebut merupakan indikator umum yang digunakan untuk mengevaluasi respons tanaman terhadap kondisi media tanam dan perlakuan yang diberikan.

Parameter pada pertumbuhan tanaman ini seperti tinggi, diameter *Melaleuca Cajuputi* merupakan variabel pengamatan yang paling representatif dalam menilai pengaruh pembenah tanah terhadap pertumbuhan kayu putih pada tanah bekas tambang, dimana pemberian kompos 2,4 kg/tanaman terbukti meningkatkan pertambahan tinggi secara nyata meski tidak berpengaruh signifikan terhadap diameter (Juliarti et al., 2023).

2.9. Penelitian Terdahulu

Dalam proses penyusunan penelitian ini, dibutuhkan berbagai sumber pustaka yang relevan sebagai landasan konseptual sekaligus pendukung setiap tahapan yang dilaksanakan. berikut merangkum sejumlah penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik yang diangkat dalam kajian ini.

Tabel 2.1 *Penelitian Terdahulu*

No.	Penulis	Tahun	Judul	Hasil Penelitian
1.	Romadhan P et al.,	2022	Perbaikan Sifat Kimia Tanah Bekas Tambang Emas dengan Pupuk Granul Biokanat	Dosis terbaik 20 ton/ha meningkatkan pH menjadi 5,54, C-organik 2,19%, N-total 0,253%, P-tersedia 24,08 ppm, KTK 29,25 cmol/kg, K-dd 0,94 cmol/kg, Mg-dd 0,45 cmol/kg, Ca-dd 1,17 cmol/kg; kriteria kesuburan tanah naik dari sangat rendah menjadi sedang.
2.	Juliarti, A., et al.	2023	Pertumbuhan Kayu Putih (*Melaleuca Cajuputi*) di Lahan Bekas Tambang Batubara dengan Aplikasi Pupuk Kompos	Dosis kompos 2,4 kg/tanaman menghasilkan pertambahan tinggi kayu putih sebesar selama pengamatan 12 bulan dibanding dosis 1,6 kg/tanaman dan tanpa pupuk; tidak berpengaruh signifikan terhadap

				diameter dan lebar tajuk.
3.	Nuriman, M., et Al.	2025	Bio-Reclamation Evaluation of Former Gold Mine Land	Reklamasi dengan bahan organik meningkatkan Indeks Kualitas Tanah dari 0,32 (rendah) menjadi 0,62 (baik); kadar Hg pada tanaman turun 99,05% (dari 11,60 mg/kg menjadi 0.11 mg/kg); populasi bakteri pereduksi merkuri meningkat 22,4 – 58,2 kali lipat
4.	Haviz, M., et Al.	2022	Pengaruh Penambahan Biochar dari Lignite pada Tanah Bekas Penambangan Batubara terhadap Potensi Imobilisasi Logam Seng (Zn)	pH tanah awal 4,9 meningkat menjadi 7,2 setelah inkubasi dengan biochar. Immobilisasi Zn tertinggi terjadi pada konsentrasi biochar 5% pada minggu ke-4
5.	Andriani, R. et Al.	2021	Peanut Pods (Arachis hypogea L.) in Ex-Mining	Konsentrasi PGPR 25% meningkatkan berat kering kacang tanah secara

			Limestone Soil Enriched with Ingigenus Bacteria	signifikan dari 25,54 g (kontrol 0%) menjadi 53,67 g – lebih dari dua kali lipat. Konsentrasi 50%, 75%, dan 100% tidak berbeda nyata dari kontrol. PGPR tidak berpengaruh signifikan terhadap berat/jumlah polong. pH, dan suhu media tanam.

Berdasarkan kelima penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa pembenah tanah berupa nano biochar, kompos, dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) secara terpisah telah terbukti efektif memperbaiki kualitas tanah maupun mendukung pertumbuhan tanaman pada tanah terdegradasi akibat aktivitas pertambangan. Kombinasi nano bichar dan bahan organik mampu memperbaiki sifat kimia tanah serta menurunkan kadar logam berat pada tanah bekas tambang emas secara signifikan (Romadhon et al., 2022). Sedangkan kompos menunjukkan bahwa mendukung pertumbuhan tinggi *Melaleuca Cajuputi* pada tanah bekas tambang batubara, sementara PGPR menunjukkan bahwa indigen mampu meningkatkan biomassa tanaman pada media tanam bekas tambang kapur. Selain itu peran nano biochar dalam mengimobilisasi logam berat melalui mekanisme adsorpsi fisika pada pori-pori (Haviz et al., 2022). Meskipun demikian, kelima penelitian tersebut masih berfokus pada penggunaan satu atau dua jenis pembenah tanah secara terpisah, pada jenis tambang (batubara atau kapur) dan jenis tanaman yang berbeda - beda, serta belum ada yang secara khusus mengkaji kombinasi nano biochar, kompos, dan PGPR secara bersamaan terhadap kualitas tanah bekas tambang emas rakyat, khususnya di Kabupaten Kulon Progo. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut, dengan mengkaji efektivitas kombinasi ketiga bahan tersebut secara terpadu dalam

memperbaiki kualitas tanah sekaligus mendukung pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* sebagai upaya rehabilitas lahan pascatambang emas rakyat.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan pada skala rumah kaca (greenhouse) yang berlokasi di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Dengan titik koordinat geografis yang dapat dilihat di maps yaitu (7°41’40.9”S; 110°25’38.3”E). Fasilitas greenhouse tersebut dimanfaatkan untuk mendukung seluruh tahapan kegiatan penelitian, yang mencakup persiapan media tanam, penanaman bibit, pemantauan pertumbuhan secara berkala, hingga pemanenan tanaman *Melaleuca Cajuputi.*

Media tanam yang digunakan merupakan tanah bekas tambang emas rakyat yang diambil langsung dari Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, sebagai representasi kondisi lahan atau tanah yang terdegradasi yang menjadi fokus kajian dalam penelitian ini. Selanjutnya analisis sampel tanah dan jaringan tanaman dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan berbagai alat untuk mendukung pelaksanaan kegiatan di lapangan maupun di laboratorium, mulai dari pengukuran, pertumbuhan tanaman, sterilisasi, penimbangan bahan, hingga pengujian hasil destruksi. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada table.

Tabel 3. 1 *Alat*

No.	Nama Alat	Keterangan
1.	Polybag 15 x 15	Digunakan sebagai tempat media tanam
2.	Caliper Digital	Sebagai alat pengukur diameter batang
3.	Meteran	Digunakan untuk mengukur tinggi tanaman
4.	Autoclave	Untuk melakukan sterilisasi peralatan laboraturium
5.	Timbangan Analitik	Untuk menimbang berat basah dan kering tanaman yang diuji
6.	Timbangan Digital	Untuk mengeringkan atau mengurangi kadar air
7.	Oven	Untuk mengeringkan atau mengurangi kadar air
8.	Kaca Alroji	Sebagai wadah saat menimbang sampel dan bahan
9.	Corong Kaca	Untuk meletakkan kertas saring ketika menyaring sampel hasil destruksi
10.	Gelas Beaker 250ml	Sebagai wadah hasil destruksi sampel
11.	Erlenmeyer 250ml	Untuk mencampur atau menampung larutan
12.	Rak Tabung Reaksi	Tempat meletakkan tabung reaksi
13.	Tabung Reaksi	Untuk mencampur dan menampung larutan sebelum dilakukan pengujian
14.	Plastik Klip	Digunakan sebagai wadah sampel setelah dihaluskan dan ditimbang
15.	Amplop Coklat	Sebagai tempat jaringan akar dan jaringan batang

Tabel 3. 2 *Bahan*

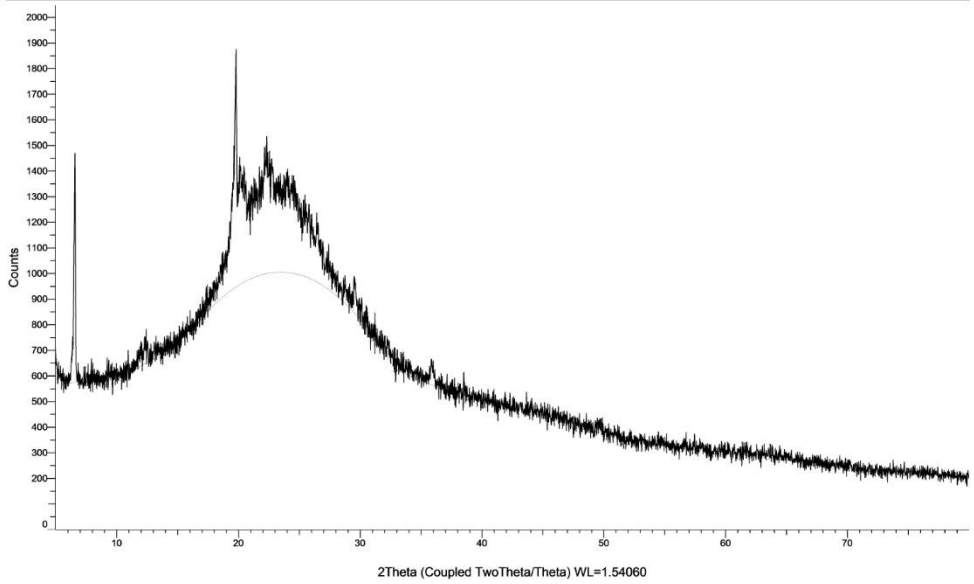
No.	Nama Bahan	Kegunaan
1.	*Melaleuca Cajuputi*	Sebagai vegetasi tanaman penguji
2.	Tanah Bekas Tambang Emas	Sebagai media tanam uji
3.	Kompos	Amelioran
4.	Nano biochar	Amelioran
5.	PGPR	Mikroorganisme

Kompos yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai amelioran organik untuk memperbaiki kualitas tanah bekas tambang. Penambahan kompos dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Selain itu, kompos juga mampu meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah sehingga proses dekomposisi bahan organik dan siklus hara dapat berlangsung lebih optimal. Oleh karena itu, aplikasi kompos banyak dimanfaatkan dalam rehabilitasi lahan terdegradasi, termasuk lahan bekas pertambangan (Ahmad et al., 2014).

Nano biochar yang digunakan dalam penelitian ini merupakan berukuran nano yang diaplikasikan sebagai amelioran untuk memeperbaiki kualitas tanah bekas tambang. Ukuran partikel yang lebih kecil dibandingkan biochar konvensional menghasilkan luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktif yang lebih besar, sehingga meningkatkan kemampuan material dalam mengadsorpsi kontaminan serta meningkatkan retensi air dan unsur hara di dalam tanah. Karakteristis tersebut menjadikan nano biochar berpotensi mendukung perbaikan kualitas tanah tercemar dan meningkatkan efektivitas remediasi. Sebelum diaplikasikan media tanam, nano biochar dikarakterisasi menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) untuk memperoleh informasi mengenai karakteristik struktur material yang digunakan dalam penelitian (Jiang et al., 2023). Berikut grafik XRD nano biochar :

17081025-1 A1.raw, 11/10/2025 3:49:05 PM

(Coupled TwoTheta/Theta)



gambar 2. 1. Grafik XRD

17081025-1 A1.raw, 11/10/2025 3:51:05 PM

Peak List #1

Visible	Icon	Color	Index	Name	Parent	Caption (display)	Scan	Angle	d Value
Yes			1	Peak #1	Peak List #1	6.579 °	17081025-1 A1.raw #1	6.579 °	13.42456 Å
Yes			2	Peak #2	Peak List #1	12.359 °	17081025-1 A1.raw #1	12.359 °	7.15612 Å
Yes			3	Peak #3	Peak List #1	19.798 °	17081025-1 A1.raw #1	19.798 °	4.48076 Å
Yes			4	Peak #4	Peak List #1	20.156 °	17081025-1 A1.raw #1	20.156 °	4.40204 Å
Yes			5	Peak #5	Peak List #1	20.467 °	17081025-1 A1.raw #1	20.467 °	4.33588 Å
Yes			6	Peak #6	Peak List #1	22.319 °	17081025-1 A1.raw #1	22.319 °	3.98009 Å
Yes			7	Peak #7	Peak List #1	22.737 °	17081025-1 A1.raw #1	22.737 °	3.90778 Å
Yes			8	Peak #8	Peak List #1	26.468 °	17081025-1 A1.raw #1	26.468 °	3.36480 Å
Yes			9	Peak #9	Peak List #1	29.569 °	17081025-1 A1.raw #1	29.569 °	3.01863 Å
Yes			10	Peak #10	Peak List #1	33.038 °	17081025-1 A1.raw #1	33.038 °	2.70917 Å
Yes			11	Peak #11	Peak List #1	35.892 °	17081025-1 A1.raw #1	35.892 °	2.49997 Å

Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	h,k,l	Match
891	1465	97.4%	n.a.	No
94.6	743	10.3%	n.a.	No
915	1862	100.0%	n.a.	No
462	1420	50.5%	n.a.	No
443	1409	48.4%	n.a.	No
474	1473	51.8%	n.a.	No
442	1445	48.4%	n.a.	No
189	1155	20.7%	n.a.	No
128	971	14.0%	n.a.	No
83.5	703	9.1%	n.a.	No
71.2	636	7.8%	n.a.	No

gambar 2. 2 Data XRD

Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), pola difraksi nano biochar menunjukkan adanya puncak yang cenderung melebar (*broad hump*). Bentuk pola tersebut mengindikasikan bahwa nano biochar yang digunakan memiliki struktur yang didominasi oleh fase amorf. Hal ini karena material amorf memiliki susunan atom yang tidak teratur dan tidak memiliki keteraturan struktur jangka panjang, sehingga menghasilkan pola difraksi yang lebih lebar. Kondisi ini berbeda dengan material kristalin yang memiliki susunan atom lebih teratur dan umumnya menghasilkan puncak difraksi yang lebih tajam. Interpretasi tersebut sejalan dengan penelitian Katuwal et al. (2023) yang melaporkan bahwa pola XRD biochar dengan puncak lebar pada kisaran 2θ 20–30° menunjukkan karakter struktur yang didominasi oleh fase amorf. Penelitian lain juga melaporkan bahwa pola difraksi lebar pada biochar berkaitan dengan keberadaan matriks karbon yang memiliki tingkat keteraturan kristalin rendah (Sharma et al., 2020).

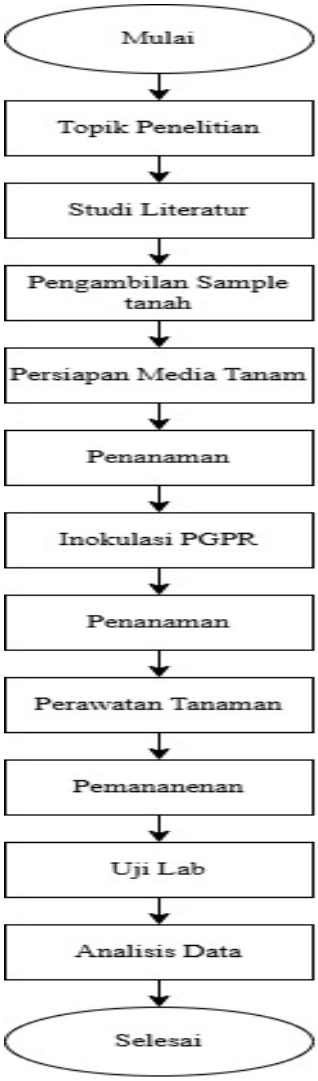
Meskipun demikian, pada pola XRD nano biochar dalam penelitian ini masih terdapat beberapa puncak yang lebih tajam, sehingga menunjukkan kemungkinan adanya sebagian komponen yang memiliki struktur kristalin. Oleh karena itu, nano biochar dalam penelitian ini dapat dikarakteristikkan sebagai material yang cenderung didominasi oleh struktur amorf dengan kemungkinan keberadaan beberapa komponen kristalin. Sementara itu, ukuran partikel nano biochar tidak dapat ditentukan secara langsung berdasarkan hasil XRD yang diperoleh. Karakterisasi XRD pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui struktur dan fase material, sedangkan ukuran partikel secara spesifik perlu dianalisis menggunakan metode lain, seperti *Particle Size Analyzer* (PSA), *Dynamic Light Scattering* (DLS), SEM, atau TEM.

Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) yang digunakan dalam penelitian ini dipersiapkan sebelum proses aplikasi pada media tanam. Mulai dari persiapan inoculum, lalu proses pengaplikasian ke media tanam. Pemberian PGPR dilakukan dengan tujuan mendukung aktivitas mikroorganisme di daerah perakaran

sehingga dapat membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman serta memperbaiki kualitas tanah bekas tambang.

3.3 Diagram Alir Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang disajikan pada gambar . Adapun uraian setiap tahapan adalah sebagai berikut.



Gambar 3. 1 *Diagram Alir Penelitian*

3.3.1. Penentuan Topik Penelitian

Tahap awal penelitian diawali dengan penentuan topik penelitian berdasarkan permasalahan yang terdapat pada tanah bekas tambang emas rakyat, khususnya terkait rendahnya kualitas tanah akibat pencemaran logam berat. Selanjutnya dilakukan penyususnan rumusan masalah, tujuan penelitian, serta penentuan variable penelitian.

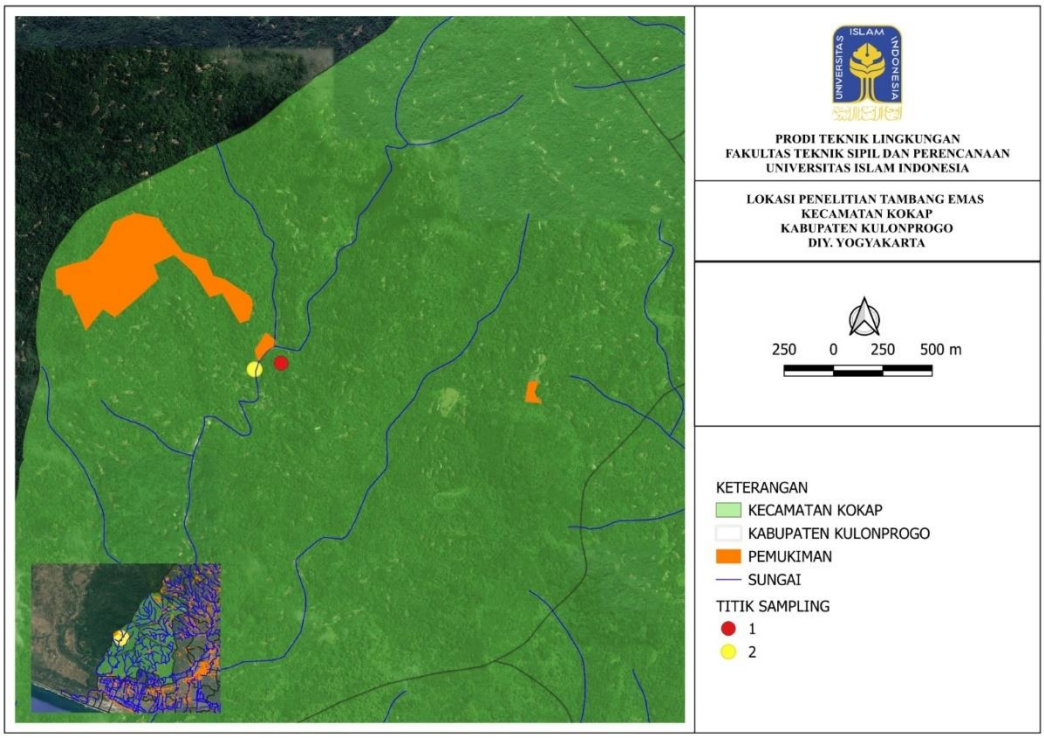
3.3.2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan berbagai referensi yang relevan berkaitan dengan tanah bekas tambang, kompos, nano biochar, *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dan *Melaleuca Cajuputi*. Tahap ini berujuan untuk memperoleh landasan teor serta mendukung penyusnan metodologi penelitian.

3.3.3. Pengambilan sampel tanah

Pengambilan sampel tanah dilakukan di lahan bekas tambang emas rakyat yang berlokasi di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sampel tanah di ambil dari dua titik pengamatan yang mewakili kondisi lokasi penelitian. Titik pengambilan sampel petama berada pada koordinat 7°49'37,9" LS dan 110°04'15,6" BT, sedangkan titik pengambilan sampel kedua berada pada koordinat 7°49'38,9" LS dan 110°04'11,2" BT.

Sampel tanah ada titik pertama diambil dari area bekas tambang emas yang berdekatan dengan lahan perkebunan milik warga dan peternahakan kambing. Sementara itu, sampel tanah pada titik kedua diperoleh dari lokasi bekas tambang emas yang berada di sekitar aliran sungai. Sampel kedua dari kedua titik tersebut selanjutnya digunakan sebagai media dalam penelitian setelah melalui tahap persiapan sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan.



Gambar 3. 2. *Peta Lokasi Sampling*

3.3.4. Persiapan media tanam

Media tanam yag digunakan dalam penelitiani ni adalah tanah bekas tambang emas. Tanah bekas tambang emas yang telah dikumpulkan terlebih dahulu diberi perlakuan sterilisasi sebelum digunakan sebagai media tanam. Sterilisasi dilakukan untuk mengurangi keberadaan mikroorganisme dalam tanah yang berpotensi memengaruhi hasil penelitian. Proses sterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 85°C selama ±5 jam. Tanah yang telah melalui proses sterilisasi kemudian digunakan dalam penyusunan media tanam sesuai dengan perlakuan yang telah ditentukan.



Gambar 3. 3 *Sterilisasi Tanah*

Setelah proses sterilisasi selesai, media tanam disiapkan dengan Setelah proses sterilisasi selesai, media tanam disiapkan dengan mencampurkan 475 gr tanah bekas tambang, kompos sebanyak 5% dari bobot tanah (25gr) dan nano biochar sebanyak 0,5% dari bobot tanah (2,5 gr). Di sesuaikan dengan perlakuan yang ada di table, komposisi varasi di table sebagai berikut.

Tabel 3. 3 *Variasi Perlakuan*

No.	Perlakuan	Keterangan
1.	S + C	Soil 475 gr + Compost 5 %
2.	S + +C+ NB	Soil 475 gr + Compost 5 %+ Nanobiochar 0.5%
3.	S + C + NB + PGPR	Soil 475 gr + Compost 5 % + Nanobiochar 0.5% + PGPR 20 ml

.



Gambar 3. 4 *Persiapan Media Tanam*

3.3.5 Penanaman Bibit

Bibit *Melaleuca Cajuputi* yang sehat dan memiliki ukuran relatif seragam ditanam pada media tanaman yang telah disiapkkan. Penanaman dilakukan dengan hati-hati untuk meminimalkan kerusakan akar sehingga tanaman dapat beradaptasi dengan baik. Bibit *Melaleuca Cajuputi* ditanam pada masing-masing pollybag sesuai dengan perlakuan yang diulang sebanyak 4 kali.

Untuk komposisi tanah polybag dengan ukuran 15 x 15 cm, meliputi sebesar 90% atau 450 gr tanah yang sudah diberi bahan pembenah, ditambah 5 % atau 25 gr kompos dan 5% atau 25 gr sekam, kemudian dicampur hingga homogen. Seluruh bahan disiapkan sesuai kebutuhan penelitian dan dikombinasikan berdasarkan rancangan perlakuan yang telah ditentukan.



Gambar 3. 5 *Penanaman Bibit*

3.3.6 Inokulasi PGPR

Mikroba yang digunakan pada penelitian ini berasal dari tanah rhizosfer di kawasan bekas tambang timah. Tanah rhizosfer dipiih karena merupakan daerah di sekitar perakaran yang memiliki aktivitas mikroorganisme relatif tinggi dan berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Sebelum diinokulasikan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dilakukan Proses peremajaan (rekultur) mikroba dilakukan secara aseptik di dalam laminar airflow yang telah disterilkan. Kultur mikroba kemudian dimasukkan ke dalam botol steril, ditutup menggunakan kertas penutup, dan diinkubasi selama 24 jam. Setelah proses inkubasi selesai, disiapkan larutan NaCl 0,9% sebanyak 1,5 L sebagai bahan pembawa (*carrier*). Selanjutnya, larutan NaCl dipindahkan ke dalam botol steril sebanyak 1 L pada masing-masing botol, kemudian ditutup kembali menggunakan kertas penutup.

Inokulasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dilakukan setelah bibit *Melaleuca Cajuputi* ditanam pada media tanam sesuai

perlakuan penelitian. Aplikasi PGPR dilakukan dengan membuat dua lubang kecil di sekitar daerah perakaran tanaman dengan posisi saling berhadapan. Selanjutnya, larutan PGPR diinokulasikan menggunakan pipet ke masing-masing lubang sebanyak 5ml, sehingga total volume PGPR yang diberikan pada setiap pollybag adalah 10ml. setelah inokulasi selesai, lubang ditutup kembali menggunakan media tanam agar larutan PGPR dapat terserap secara optimal di daerah perakaran tanaman.

3.3.7 Perawatan tanaman

Perawatan tanaman dengan pemeliharaan tanaman yang dilakukan secara rutin selama masa penelitian untuk menjaga kondisi tanaman tetap optimal. Penyiraman dilakukan setiap hari pada sore hari sekitar pukul 16.00 WIB guna mempertahankan kelembapan media tanam. Selain itu, pemeliharaan meliputi pengendalian gulma dengan mencabut tanaman liar yang tumbuh pada media tanam serta pengendalian hama melalui penyemprotan insektisida apabila ditemukan serangan hama pada tanaman. Pengamatan pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* dilakukan secara berkala setiap dua minggu sekali dengan mengukur parameter pertumbuhan yang meliputi tinggi tanaman, dan diameter tanaman.



Gambar 3. 6 *Pengukuran Diameter*

3.3.8 Pemanenan

Pemanenan dilakukan setelah tanman mencapai umur 4,5 bulan sejak penanaman. Pada tahap ini, tanaman *Melaleuca Cajuputi* dipanen dengan memisahkan bagian tajuk (batang dan daun) dari sistem perakaran. Akar tanaman dibersihkan menggunakan air mengalir hingga seluruh sisa media tanam yang menempel hilang. Selanjutnya, masing-masing bagian tanaman ditimbang untuk memperoleh berat basah, kemudian dimasukkan ke dalam wadah atau amplop yang telah diberi label sesuai perlakuan. Untuk menentukan berat kering, sampel tajuk dan akar dikeringkan menggunakan oven pada suhu 70°C selama 72 jam atau hingga mencapai berat konstan, kemudian ditimbang kembali.



Gambar 3. 7 Pemanenan Tanaman

3.3.9 Uji Laboratorium

Uji laboratorium dilakukan di Laboratorium Kualitas Lngkugan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pengujian dilakukan terhadap sampel tanah dan sampel tanaman yang telah dipanen pada akhir masa penelitian. Analisis laboratorium bertujuan untuk mengetahui kandungan fosfor ((P_2O_5)) dan merkuri (Hg) pada masing-masing sampel sebagai parameter dalam mengevaluasi potensi pemberian kompos, nano biochar, dan *Plant Growth*

Promoting Rhizobacteria (PGPR) terhadap tanah bekas tambang emas dan pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi*.

Parameter yang dianalisis untuk sampel tanah yaitu kandungan pH tanah, fosfor (P_2O_5), kandungan merkuri (Hg) dan pertumbuhan tanaman Melaleuca cajuputi. Sedangkan untuk sampel tanaman parameter yang di analisis juga sama yaitu kandungan fosfor (P_2O_5), kandungan merkuri (Hg), dan pertumbuhan tanaman Melaleuca cajuputi.

3.3.9.1. Analisis Kandungan Fosfor (P_2O_5)

Analisis kandungan fosfor (P_2O_5) pada sampel tanah dan sampel tanaman dilakukan menggunakan metode P tersedia Bray I yang mengacu pada Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk Edisi ke-3. Sampel dipreparasi sesuai dengan prosedur laboratorium, kemudian diekstraksi menggunakan larutan Bray I. Filtrat hasil ekstraksi direaksikan dengan pereaksi membentuk warna hingga terbentuk larutan berwarna yang selanjutnya dianalisis menggunakan *spektrofotometer*.

Spektrofotometer bekerja berdasarkan prinsip pengukuran absorbansi cahaya pada panjang gelombang tertentu. Intensitas cahaya yang diserap oleh larutan sebanding dengan konsentrasi fosfor yang terkandung dalam sampel.



Gambar 3. 8 *Pembacaan Spektrofotometer*

3.3.9.2. Analisis Kandungan Merkuri (Hg)

Analisis kandungan merkuri (Hg) pada sampel tanah dan sampel tanaman dilakukan menggunakan metode destruksi asam mengacu SNI 8910:2021. Proses destruksi dilakukan untuk melarutkan unsur merkuri yang terdapat di dalam sampel sehingga siap untuk di analisis. Pengukuran

kadar merkuri dilakukan mengguanakan instrumen *Inductively Coupled Plasma* (ICP). Prinsip kerja ICP adalah mengionisasi unsur-unsur yang terdapat dalam larutan sampel menggunakan plasma argon bersuhu tinggi. Ion yang dihasilkan kemudian dideteksi oleh instrumen sehingga konsentrasi merkuri pada sampel dapat ditentukan dengan tingkat ketelitian dan sensitivitas yang tinggi.



Gambar 3. 9 *Pembacaan Uji Hg (ICP)*

3.3.10 Analisis data

Data yang diperoleh dari pengukuran tanaman secara hasil analisis laboratorium berupa (P_2O_5) dan Hg pada sampel tanah dan tanaman selanjutnya diolah dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Analisis dilakukan secara deskriptif untuk membandingkan setiap perlakuan berdasarkan parameter yang diamati, sehingga dapat diketahui pengaruh pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR terhadap pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* serta perubahan kandungan (P_2O_5) dan Hg pada tanah bekas tambang emas. Adapun rumus yang digunakan dalam menghitung kadar (P_2O_5) dan Kadar Merkuri (Hg) :

Kadar (P_2O_5) tersedia pada tanah dan tanaman Metode Bray I :

Kadar (P_2O_5) tersedia (ppm)

$$= ppm\ kurva\ x\ \frac{ml\ ekstrak}{1.000\ ml}\ x\ 1.000\ g\ (g\ contoh)^{-1}\ x\ fp\ x\ \frac{142}{190}\ x\ fk$$

$$= ppm\ kurva\ x\ \frac{25}{1.000\ ml}\ x\ 1.000\ g\ (2{,}5)^{-1}\ x\ fp\ x\ \frac{142}{190}\ x\ fk$$

Keterangan :

Ppm kurva : kadar contoh yang didiperoleh dari kurva deret standar

Fp : faktor pengenceran

142/190 : faktor konversi bentuk PO4 menjadi (P_2O_5)

Fk : faktor koreksi kadar air 100/(100-% kadar air)

Kadar Merkuri (Hg) tanah dan tanaman :

Kadar logam berdasarkan berat aktual

$$\left({}^{m}/_{g}\right) = \frac{C\ x\ V}{W}\ x\ fp$$

Keterangan :

C : konsentrasi contoh uji yang di dapat dari SSA-Nyala atau ICP

V : volume akhir setelah proses destruksi (mL)

W : berat contoh uji (g)

Fp : faktor pengenceran

Kadar Logam berdasarkan berat kering contoh uji

$$\left({}^{m}/_{g}\right) = \frac{C\ x\ V}{W\ x\ P} x\ fp$$

Keterangan :

C : konsentrasi contoh uji yang di dapat dari SSA-Nyala atau ICP

V : volume akhir setelah proses destruksi (mL)

W : berat contoh uji (g)

Fp : faktor pengenceran

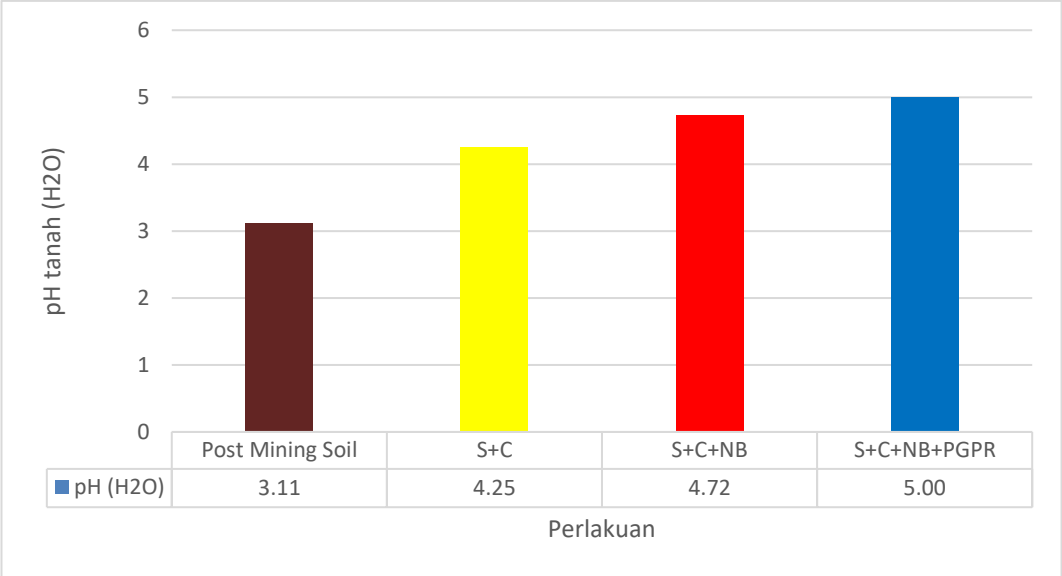
P : fraksi padat

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi kombinasi kompos, nano biochar, dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dalam memperbaiki kualitas tanah bekas tambang emas rakyat serta mendukung pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*. Pengamatan dilaksanakan selama 18 minggu menggunakan tiga kombinasi perlakuan, yaitu S+C, S+C+NB, dan S+C+NB+PGPR. Selama masa penelitian, seluruh tanaman uji menunjukkan tingkat kelangsungan hidup sebesar 100% hingga akhir masa pengamatan. Evaluasi dilakukan melalui analisis beberapa parameter yang meliputi perubahan sifat kimia tanah, yaitu pH, kandungan merkuri (Hg), dan fosfor (P_2O_5), pertumbuhan tanaman yang meliputi tinggi, diameter, dan biomassa, serta analisis efisiensi penggunaan bahan pembenah tanah. Pembahasan setiap parameter dilakukan secara berurutan dengan mengaitkan hubungan antar parameter sehingga diperoleh gambaran mengenai efektivitas masing-masing kombinasi bahan pembenah dalam mendukung proses remediasi tanah bekas tambang emas rakyat.

4.1.Potensi Bahan Pembenah terhadap Kandungan pH Tanah

Sebelum membahas parameter pertumbuhan tanaman, perlu diketahui bahwa perubahan sifat kimia tanah merupakan salah satu indikator keberhasilan pemberian bahan pembenah. Salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi perubahan tersebut adalah derajat keasaman (pH). Nilai pH berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara, aktivitas mikroorganisme, serta mobilitas logam berat di dalam tanah. Oleh karena itu, pengukuran pH H_2O dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemberian kompos, nano biochar, dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap kondisi kimia tanah bekas tambang emas rakyat di Kulon Progo (Brady & Weil, 2017; Thomas, 1996). Adapun gambar grafik dari pH tanah sebagai berikut :



Gambar 4. 1. Grafik pH tanah

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pemberian bahan pembenah meningkatkan nilai pH H_2O pada seluruh perlakuan. Nilai pH meningkat dari 4,25 pada S+C menjadi 4,72 pada S+C+NB dan mencapai 5,00 pada S+C+NB+PGPR. Meskipun demikian, seluruh perlakuan masih berada pada kondisi masam. Peningkatan pH pada perlakuan yang mengandung nano biochar diduga berkaitan dengan keberadaan kation basa dan karakteristik permukaan biochar yang dapat berkontribusi terhadap perbaikan kondisi kimia tanah (Lehmann & Joseph, 2015). Penambahan kompos juga dapat membantu meningkatkan kapasitas penyangga tanah sehingga perubahan pH menjadi lebih stabil (Agegnehu et al., 2017). Nilai pH tertinggi pada S+C+NB+PGPR menunjukkan bahwa keberadaan PGPR bersama nano biochar dan kompos dapat memberikan kondisi lingkungan perakaran yang lebih mendukung.

Perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan nilai pH tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi tersebut diduga merupakan hasil interaksi antara nano biochar dan PGPR dalam memperbaiki lingkungan perakaran. PGPR yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Kawasan bekas tambang timah sehingga memiliki kemampuan beradaptasi pada lingkungan yang mengalami cekaman (*environmental stress*). Mikroorganisme tersebut berperan dalam meningkatkan aktivitas biologis di daerah rizosfer, memperbaiki efisiensi pemanfaatan unsur hara, serta mendukung perkembangan system perakaran (Ojuederie & Babalola, 2017).

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR mampu meningkatkan nilai pH H_2O dari 3,11 pada kondisi awal tanah bekas tambang menjadi 5,00 pada perlakuan S+C+NB+PGPR. Walaupun kondisi tanah masih tergolong masam, peningkatan tersebut menunjukkan adanya perubahan sifat kimia tanah akibat pemberian bahan pembenah. Perubahan kondisi kimia ini diperkirakan tidak hanya memengaruhi ketersediaan unsur hara, tetapi juga berpotensi mengubah perilaku logam berat di dalam tanah. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya difokuskan pada distribusi merkuri (Hg) untuk mengetahui bagaimana perubahan kondisi tanah tersebut memengaruhi keberadaan logam berat setelah pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR (Thomas, 1996).

4.2. Potensi Bahan Pembenah terhadap Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg) Tanah dan Tanaman Melaleuca cajuputi

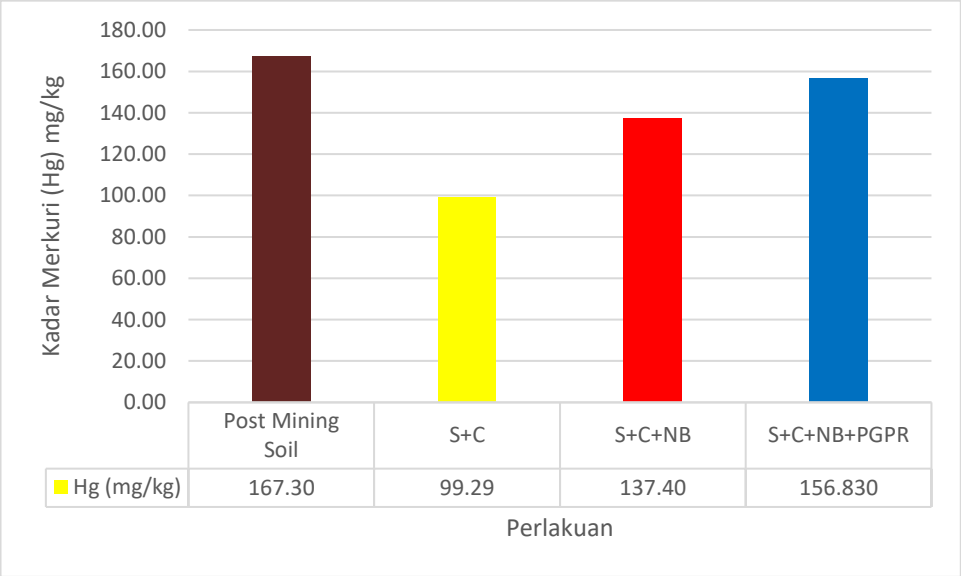
Perbaikkan kondisi kimia tanah yang ditunjukkan melalui peningkatan nilai pH belum dapat menggambarkan secara menyeluruh keberhasilan pemberian bahan pembenah. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian terhadap perilaku logam berat merkuri (Hg) pada tanah serta akumulasinya pada tanaman *Melaleuca cajuputi*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana kombinasi kompos, nano biochar, dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) memengaruhi keberadaan Hg setelah proses ameliorant tanah bekas tambang emas rakyat. Perubahan derajat keasaman tanah diketahui berhubungan erat dengan perilaku logam berat di dalam tanah.

Meningkatnya nilai pH umumnya Logam berat merkuri (Hg) merupakan salah satu penccemar utama padaenyebabkan logam berat menjadi stabil karena lebh mudah teradsorpsi pada permukaan mineral, bahan organic, maupun bahan pembenah, sehingga mobilitas dan ketersediaannya bagi tanaman cenderung menurun (Alloway, 2013; Brady et al., 2017). Berdasarkan konsep tersebut, analisis kandungan Hg dalam penelitian ini dilakukan pada tanah serta jaringan tanaman untuk mengevaluasi pola distribusi merkuri setelah pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR.

4.2.1. Kadar Merkuri (Hg) pada Tanah

Berdasarkan hasil analisis, kandungan merkuri (Hg) total pada tanah menunjukkan perbedaan pemberian bahan pembenah. Kondisi awal tanah

bekas tambang (*post minning soil*) memiliki kandungan Hg sebesar 167,30 mg/kg. setelah diberikan perlakuan, kandungan Hg total menurun menjadi 99,29 mg/kg pada perlakuan S+C, kemudian meningkat menjadi 137,40 mg/kg pada perlakuan S+C+NB, dan mencapai 156,83 mg/kg pada perlakuan S+C+NB+PGPR. Data tersebut menunjukkan bahwa seluruh perlakuan masih memiliki kandungan Hg yang relative tinggi, namun nilainya berbeda pada setiap kombinasi bahan pembenah yang digunakan. Berikut gambar grafik Hg pada tanah :



Gambar 4. 2. Kadar Merkuri (Hg) pada Tanah

Apabila dikaitkan dengan pembahasan sebelumnya, peningkatan nilai pH akibat pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR belum diikuti oleh penurunan kandungan Hg total di dalam tanah. Meskipun nilai pH meningkat dari kondisi awal yang sangat masam menjadi pH 5,00 pada perlakuan S+C+NB+PGPR, analisis menunjukkan bahwa kandungan Hg masih tetap terukur dalm jumlah yang tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan pH tidak selalu diikuti berkurangnya kandungan logam berat, terutama apabila parameter yang dianalisis merupakan Hg total. Peningkatan pH lebih berpengaruh terhadap jumlah total logam yang terdapat di dalam tanah.

Perlu diperhatikan bahwa analisis Hg pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)* setelah proses

destruksi asam. Oleh karena itu, parameter yang diperoleh merupakan kandungan Hg total, sehingga seluruh merkuri yang masih berada di dalam tanah akan tetap terukur, baik dalam bentuk tersedia maupun yang telah terikat pada fraksi tanah. Oleh karena itu, tingginya kandungan Hg total tidak dapat diartikan bahwa seluruh merkuri berada dalam bentuk yang mudah diserap oleh tanaman, tetapi menunjukkan bahwa logam tersebut masih tersimpan di dalam media tanah (Alloway, 2013).

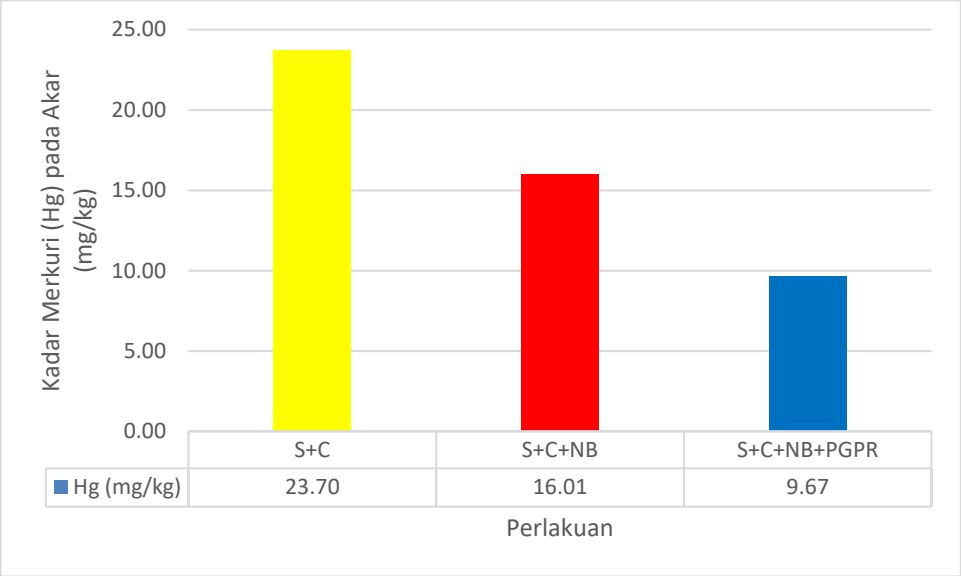
Peningkatan Hg total pada perlakuan yang mengandung nano biochar di duga berkaitan dengan kemampuan biochar dalam mengadsorpsi logam berat. Nano biochar memiliki luas permukaan yang besar, pori yang berkembang, serta gugus fungsi aktif seperti karboksil (-COOH) dan hidroksil (-OH) yang mampu mengikat ion logam melalui mekanisme adsorpsi, kompleksasi, dan pertukaran ion. Mekanisme tersebut menyebabkan merkuri lebih banyak tertahan pada permukaan biochar sehingga mobilitasnya di dalam tanah menjadi lebih rendah. Hasil penelitian ini sejalan dengan bahwa biochar mampu mengimobilisasi logam berat melalui proses adsorpsi sehingga mengurangi perpindahan logam di dalam lingkungan tanah (Lehmann dan Joseph , 2015). Temuan serupa bahwa biochar berpotensi menurunkan mobilitas logam berat karena meningkatkan kemampuan tanah dalam mengikat unsur pencemar (Beesley et al. 2011).

Pada perlakuan S+C+NB+PGPR, kandungan Hg total menjadi yang tertinggi di antara seluruh perlakuan. Kondisi tersebut diduga lebih dipengaruhi oleh meningkatnya akumulasi Hg akibat aktivitas PGPR, melainkan karena kombinasi nano biochar dan PGPR mampu mempertahankan Hg tetap berada di dalam media tanah. PGPR pada penelitian ini lebih berperan dalam meningkatkan aktivitas biologis di daerah perakaran, merangsang pertumbuhan tanaman, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara di bandingkan sebagai agen utama untuk menghilangkan logam berat (Ojuederie & Babalola, 2017). Dengan demikian, tingginya kandungan Hg total pada perlakuan S+C+NB+PGPR mengindikasikan bahwa Sebagian besar merkuri masih tertahan di dalam

tanah setelah proses imobilisasi, bukan menunjukkan bahwa logam tersebut menjadi tersedia bagi tanaman.

4.2.2. Kadar Merkuri (Hg) pada Akar

Kadar merkuri (Hg) pada akar menunjukkan kecenderungan yang berbeda dibandingkan dengan kadar Hg pada batang. Perlakuan S+C memiliki kandungan Hg akar tertinggi sebesar 23,70 mg/kg, kemudian menurun pada perlakuan S+C+NB sebesar 16,01 mg/kg, dan mencapai nilai terendah pada perlakuan S+C+NB+PGPR sebesar 9,67 mg/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan nano biochar, baik tanpa maupun dengan PGPR, cenderung menurunkan akumulasi Hg pada jaringan akar. Berikut dapat dilihat di grafik Kadar Merkuri (Hg) pada akar :



Gambar 4. 3. Grafik Kadar Merkuri (Hg) pada Akar

Apabila dikaitkan dengan hasil analisis Hg tanah, perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki kandungan Hg total tanah tertinggi sebesar 156,83 mg/kg, sedangkan kandungan Hg pada akar justru merupakan yang terendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingginya kandungan Hg total dalam tanah tidak selalu diikuti oleh tingginya akumulasi Hg pada jaringan akar.

Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan interaksi Hg dengan nano biochar. Nano biochar memiliki luas permukaan, struktur pori, dan situs aktif pada permukaannya yang dapat berperan dalam mengikat Hg melalui

berbagai mekanisme sorpsi. Interaksi tersebut dapat menyebabkan sebagian Hg menjadi lebih tertahan pada nano biochar atau matriks tanah sehingga mobilitas dan ketersediaannya bagi tanaman dapat berkurang. Literatur menunjukkan bahwa biochar dapat menurunkan mobilitas dan bioavailabilitas Hg melalui interaksi langsung antara Hg dan permukaan biochar, meskipun pengaruhnya juga dipengaruhi oleh sifat biochar dan kondisi tanah (Xu et al., 2021; Li et al., 2024).

Hg yang berada dalam bentuk yang dapat diakses oleh tanaman selanjutnya dapat mencapai permukaan akar. Pada permukaan akar terdapat dinding sel dengan situs bermuatan yang memiliki kemampuan pertukaran ion. Situs tersebut dapat berinteraksi dengan ion yang berada di sekitar akar, termasuk kation logam. Dengan demikian, Hg dalam bentuk ionik yang mencapai permukaan akar secara teoritis dapat mengalami interaksi melalui mekanisme pertukaran ion dan adsorpsi pada situs bermuatan tersebut. Proses ini dapat menyebabkan sebagian Hg tertahan pada permukaan atau dinding sel akar, sedangkan sebagian Hg lainnya dapat masuk ke jaringan akar. Sifat pertukaran ion pada dinding sel akar diketahui berperan dalam interaksi akar dengan ion mineral maupun logam berat dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH dan kekuatan ionik (Zhao et al., 2021).

Setelah Hg masuk ke jaringan akar, Hg tidak selalu tertahan seluruhnya pada akar. Sebagian Hg dapat ditransportasikan menuju bagian tanaman di atas permukaan tanah melalui jaringan pengangkut. Literatur mengenai transport Hg pada tanaman menunjukkan bahwa setelah memasuki akar, Hg dapat terakumulasi pada jaringan akar atau mengalami perpindahan ke bagian atas tanaman melalui jalur transportasi internal tanaman. Oleh karena itu, rendahnya kandungan Hg pada akar tidak dapat langsung diartikan sebagai rendahnya penyerapan Hg oleh tanaman, karena sebagian Hg yang berhasil masuk ke tanaman dapat mengalami perpindahan menuju organ tanaman lainnya.

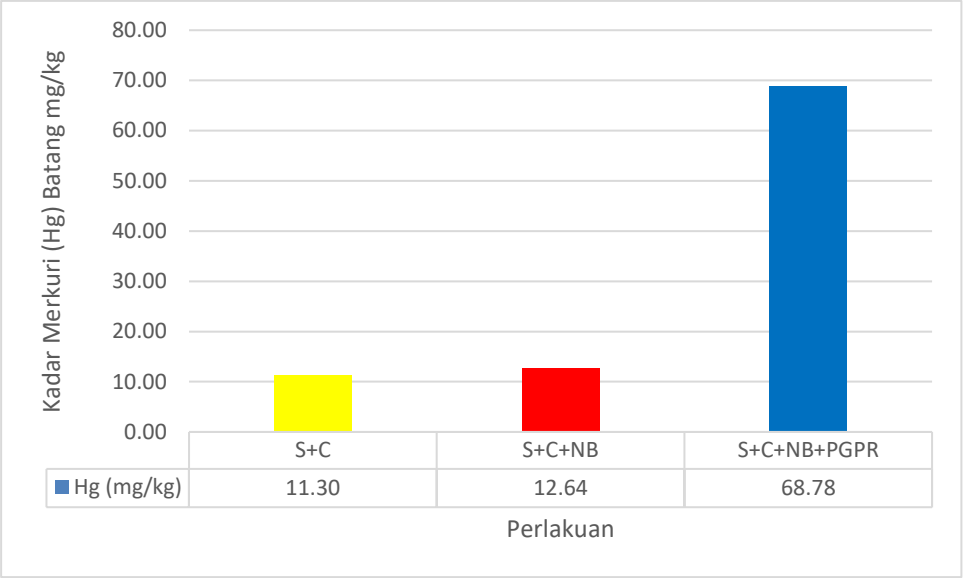
Keberadaan PGPR juga diduga dapat memengaruhi kondisi rizosfer dan respons tanaman terhadap cekaman logam berat. PGPR dapat menghasilkan senyawa yang mendukung pertumbuhan tanaman, seperti

indole-3-acetic acid (IAA), siderofor, serta enzim ACC-deaminase. Senyawa dan aktivitas tersebut berpotensi mendukung perkembangan akar dan membantu tanaman menghadapi kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Namun, karena produksi IAA, siderofor, dan aktivitas ACC-deaminase tidak dianalisis secara langsung dalam penelitian ini, mekanisme tersebut digunakan sebagai kemungkinan penjelasan terhadap respons tanaman dan tidak dapat dianggap sebagai mekanisme yang terbukti secara langsung.

Dengan demikian, pola kandungan Hg pada penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan kandungan Hg total tanah yang paling tinggi, tetapi kandungan Hg akar paling rendah. Kondisi tersebut diduga terjadi karena sebagian Hg lebih tertahan di dalam tanah melalui interaksi dengan nano biochar, sehingga tidak seluruh Hg total berada dalam bentuk yang dapat diakses oleh akar. Hg yang mencapai permukaan akar selanjutnya dapat berinteraksi dengan situs bermuatan melalui adsorpsi dan pertukaran ion, kemudian sebagian dapat masuk ke jaringan akar dan mengalami transportasi menuju bagian tanaman lainnya. Rendahnya Hg akar yang disertai dengan tingginya Hg batang pada perlakuan S+C+NB+PGPR selanjutnya mengindikasikan adanya kemungkinan translokasi Hg dari akar menuju batang. Mekanisme distribusi Hg tersebut menjadi dasar untuk pembahasan kandungan Hg pada batang.

4.2.3. Kadar Merkuri (Hg) pada Batang

Kandungan merkuri (Hg) pada batang Melaleuca cajuputi menunjukkan variasi pada setiap perlakuan. Perlakuan S+C menghasilkan kandungan Hg sebesar 11,30 mg/kg, kemudian meningkat menjadi 12,64 mg/kg pada perlakuan S+C+NB, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan S+C+NB+PGPR yaitu sebesar 68,78 mg/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan nano biochar dan PGPR menghasilkan kandungan Hg batang yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan S+C. Berikut grafik kadar merkuri (Hg) pada batang. Berikut grafik Kadar Merkuri (Hg) pada batang :



Gambar 4. 4. Grafik Kadar Merkuri (Hg) Batang

Apabila dikaitkan dengan hasil analisis Hg pada tanah dan akar, perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki kandungan Hg total tanah tertinggi yaitu sebesar 156,83 mg/kg dan kandungan Hg akar terendah yaitu sebesar 9,67 mg/kg, tetapi kandungan Hg batang justru paling tinggi yaitu sebesar 68,78 mg/kg. Pola tersebut menunjukkan bahwa Hg yang terakumulasi pada tanaman tidak seluruhnya tertahan pada jaringan akar. Kondisi tersebut diduga menunjukkan adanya perpindahan Hg dari akar menuju bagian tanaman di atas permukaan tanah, sehingga rendahnya kandungan Hg pada akar dapat terjadi bersamaan dengan tingginya kandungan Hg pada batang.

Setelah Hg masuk ke jaringan akar, sebagian Hg dapat tetap tertahan pada jaringan akar, sedangkan sebagian lainnya dapat mengalami perpindahan menuju bagian tanaman di atas permukaan tanah. Proses perpindahan logam dari akar menuju bagian tanaman di atas permukaan tanah disebut translokasi. Salah satu jalur transportasi yang berperan dalam perpindahan tersebut adalah jaringan xilem. Xilem berfungsi mengangkut air dan unsur mineral dari akar menuju bagian atas tanaman, sehingga Hg yang telah masuk ke jaringan pengangkut dapat terbawa bersama aliran air menuju batang. Literatur menunjukkan bahwa Hg yang telah memasuki akar dapat tertahan pada jaringan akar atau melanjutkan perpindahan menuju bagian tanaman di atas permukaan tanah, dengan tingkat translokasi

yang dipengaruhi oleh spesies tanaman dan kondisi lingkungan (Israr et al., 2006; Zhou et al., 2021).

Pada perlakuan S+C+NB+PGPR, rendahnya kandungan Hg pada akar yang disertai dengan tingginya kandungan Hg pada batang diduga menunjukkan bahwa sebagian Hg yang berhasil masuk ke jaringan akar tidak seluruhnya tertahan pada akar dan selanjutnya mengalami translokasi menuju batang. Dengan demikian, rendahnya kandungan Hg pada akar tidak dapat secara langsung diartikan sebagai rendahnya penyerapan Hg oleh tanaman. Kandungan Hg yang terukur pada suatu jaringan merupakan hasil dari keseimbangan antara Hg yang masuk ke jaringan, Hg yang tertahan atau terakumulasi, serta Hg yang berpindah menuju jaringan tanaman lainnya.

Keberadaan nano biochar dapat memengaruhi distribusi Hg antara tanah dan tanaman melalui kemampuannya dalam mengikat Hg pada permukaan dan struktur porinya. Mekanisme sorpsi tersebut dapat menyebabkan sebagian Hg menjadi lebih tertahan di dalam tanah sehingga mobilitasnya berkurang. Namun, proses tersebut tidak menyebabkan seluruh Hg menjadi tidak dapat diakses oleh akar. Sebagian Hg yang masih berada dalam bentuk yang dapat diakses oleh tanaman tetap berpotensi diserap oleh akar dan selanjutnya mengalami transportasi menuju jaringan tanaman lainnya. Oleh karena itu, tingginya kandungan Hg total tanah pada perlakuan S+C+NB+PGPR tidak secara langsung menunjukkan bahwa seluruh Hg tersebut dapat diserap oleh tanaman.

Selain pengaruh nano biochar, keberadaan PGPR dapat memengaruhi kondisi rizosfer dan respons fisiologis tanaman terhadap cekaman logam berat. PGPR dapat menghasilkan senyawa pemacu pertumbuhan, seperti indole-3-acetic acid (IAA), serta memiliki aktivitas ACC-deaminase yang berperan dalam membantu tanaman menghadapi cekaman lingkungan. IAA dapat mendukung perkembangan dan percabangan akar, sedangkan ACC-deaminase dapat memecah 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC), yaitu prekursor etilen, sehingga kadar etilen yang menghambat pertumbuhan pada kondisi cekaman dapat

ditekan. Mekanisme tersebut dapat membantu mempertahankan perkembangan akar dan pertumbuhan tanaman pada kondisi yang mengandung logam berat (Ojuederie & Babalola, 2017; Ma et al., 2016).

Dalam penelitian ini, produksi IAA, siderofor, maupun aktivitas ACC-deaminase tidak dianalisis secara langsung. Oleh karena itu, mekanisme tersebut tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa PGPR secara langsung meningkatkan translokasi Hg dari akar ke batang. Peran PGPR lebih tepat diposisikan sebagai kemungkinan mekanisme yang mendukung kondisi rizosfer, perkembangan akar, dan toleransi tanaman terhadap cekaman, yang selanjutnya dapat memengaruhi respons tanaman terhadap keberadaan Hg.

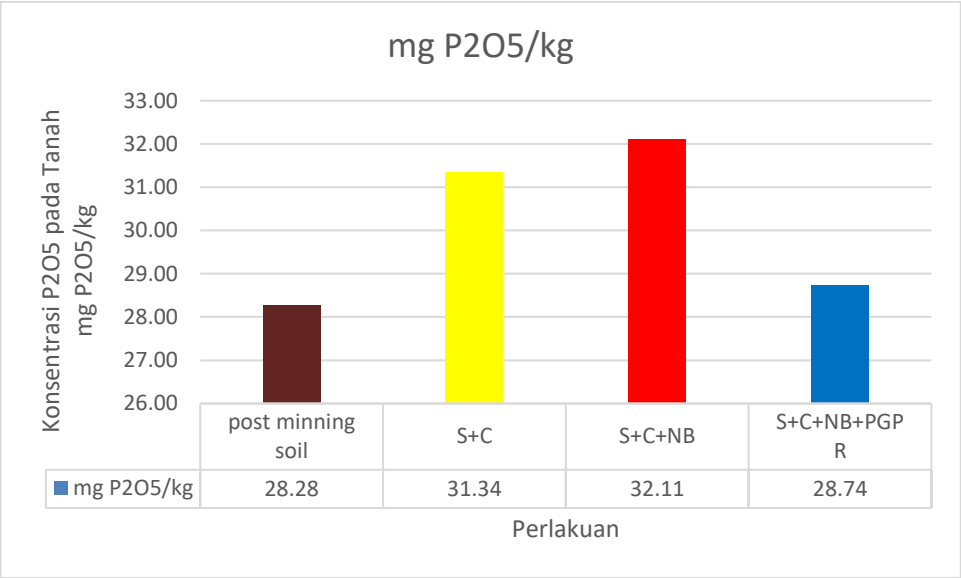
Secara keseluruhan, perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan pola distribusi Hg yang berbeda antara tanah, akar, dan batang, yaitu kandungan Hg total tanah tertinggi sebesar 156,83 mg/kg, kandungan Hg akar terendah sebesar 9,67 mg/kg, dan kandungan Hg batang tertinggi sebesar 68,78 mg/kg. Pola tersebut diduga menunjukkan bahwa sebagian Hg yang berada di dalam tanah dapat tertahan melalui interaksi dengan nano biochar, sedangkan Hg yang masih dapat diakses oleh akar dapat diserap dan masuk ke jaringan akar. Selanjutnya, sebagian Hg tersebut diduga mengalami transportasi melalui jaringan pengangkut dan translokasi dari akar menuju batang. Dengan demikian, rendahnya kandungan Hg pada akar yang disertai dengan tingginya kandungan Hg pada batang pada perlakuan S+C+NB+PGPR dapat mengindikasikan adanya distribusi Hg yang lebih besar menuju bagian tanaman di atas permukaan tanah.

4.3. Potensi Bahan Pembenah terhadap Kandungan Nutrisi Fosfor (P_2O_5) Tanah dan Tanaman

4.3.1. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Tanah

Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan P_2O_5 tersedia berbeda pada setiap perlakuan. Tanah pascatambang (*post mining soil*) memiliki kandungan P_2O_5 sebesar 28,28 mg/kg. Setelah pemberian kompos (S+C), kandungannya meningkat menjadi 31,34 mg/kg, kemudian mencapai nilai tertinggi pada perlakuan S+C+NB sebesar 32,11 mg/kg. Sementara itu,

perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki kandungan P_2O_5 sebesar 28,74 mg/kg, lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C+NB, namun masih lebih tinggi dibandingkan tanah sebelum perlakuan. Berikut grafik konsentrasi P2O5 pada tanah :



Gambar 4. 5. Grafik Konsentrasi (P_2O_5) Tersedia pada Tanah

Peningkatan kandungan P_2O_5 pada perlakuan S+C dan S+C+NB diduga berkaitan dengan meningkatnya pH tanah yang telah dibahas pada parameter sebelumnya. Pada tanah masam, fosfor mudah terikat oleh Fe dan Al sehingga sulit tersedia bagi tanaman. Peningkatan pH mengurangi ikatan tersebut sehingga fosfor menjadi lebih tersedia (Penn & Camberato, 2019).

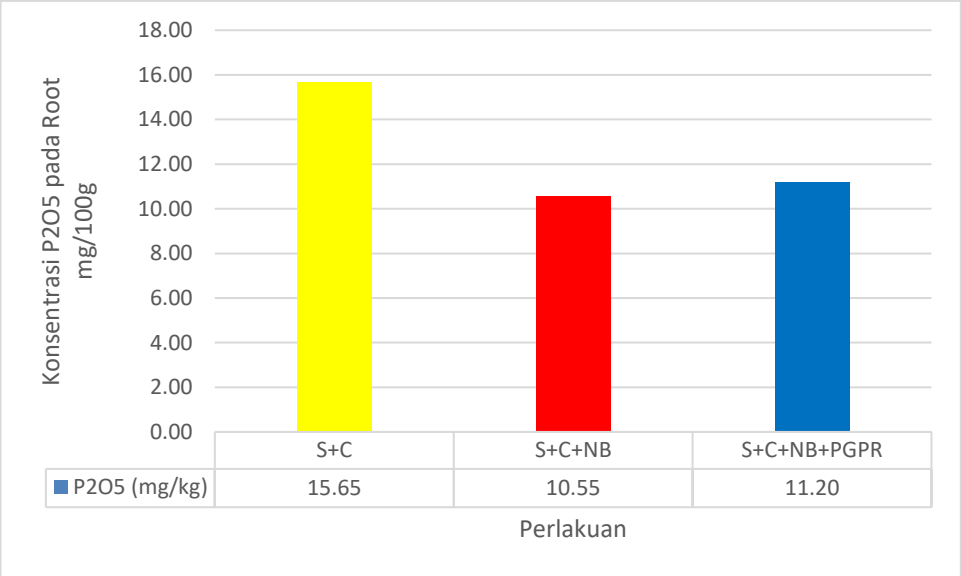
Berdasarkan kriteria sifat kimia tanah menurut Staf Pusat Penelitian Tanah (1983), kandungan P_2O_5 tersedia yang dianalisis menggunakan metode Bray I pada seluruh perlakuan termasuk dalam kategori tinggi, yaitu pada kisaran 26–35 ppm. Tanah bekas tambang memiliki kandungan P_2O_5 sebesar 28,28 mg/kg, sedangkan perlakuan S+C, S+C+NB, dan S+C+NB+PGPR masing-masing sebesar 31,34 mg/kg, 32,11 mg/kg, dan 28,74 mg/kg. Meskipun seluruh perlakuan berada pada kategori yang sama, perbedaan nilai P_2O_5 menunjukkan bahwa penambahan kompos, nano biochar, dan PGPR tetap memengaruhi dinamika ketersediaan serta pemanfaatan fosfor di dalam tanah.

Perlakuan S+C+NB menghasilkan kandungan P_2O_5 tertinggi, menunjukkan bahwa nano biochar mampu mempertahankan fosfor di dalam tanah melalui luas permukaan dan struktur porinya yang tinggi sehingga ketersediaan fosfor di sekitar perakaran dapat dipertahankan (Glaser et al., 2019). Sebaliknya, kandungan P_2O_5 pada perlakuan S+C+NB+PGPR lebih rendah. Kondisi ini diduga karena sebagian fosfor telah diserap dan dimanfaatkan tanaman selama pertumbuhan. Fosfor berperan dalam pembentukan jaringan, perkembangan akar, pembelahan sel, dan transfer energi sehingga kebutuhan tanaman terhadap unsur tersebut akan meningkat seiring pertumbuhannya (Tesfaye et al., 2021).

Secara keseluruhan, pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR meningkatkan ketersediaan fosfor dibandingkan tanah pascatambang. Nano biochar berperan dalam mempertahankan ketersediaan fosfor di dalam tanah, sedangkan penambahan PGPR diduga menyebabkan sebagian fosfor yang tersedia lebih banyak diserap oleh tanaman sehingga kandungan P yang tersisa di dalam tanah menjadi lebih rendah.

4.3.2. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Akar

Kandungan P_2O_5 pada akar *Melaleuca cajuputi* menunjukkan perbedaan pada setiap perlakuan. Perlakuan S+C memiliki kandungan P_2O_5 tertinggi sebesar 15,65 mg/100 g, kemudian menurun pada perlakuan S+C+NB menjadi 10,55 mg/100 g, sedangkan perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan nilai 11,20 mg/100 g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan nano biochar maupun kombinasi nano biochar dan PGPR tidak meningkatkan akumulasi fosfor pada jaringan akar. Berikut disajikan grafik konsentrasi P_2O_5 pada akar.



Gambar 4. 6. Grafik Konsentrasi (P_2O_5) pada Akar

Apabila dikaitkan dengan parameter sebelumnya, perlakuan S+C+NB memiliki kandungan P tersedia tanah tertinggi, sedangkan kandungan P pada akar justru lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C. Kondisi ini menunjukkan bahwa tingginya fosfor yang tersedia di dalam tanah tidak selalu diikuti oleh tingginya akumulasi fosfor pada akar. Sebagian fosfor yang diserap diduga telah ditranslokasikan ke bagian tanaman lain atau dimanfaatkan untuk mendukung berbagai proses fisiologis sehingga tidak seluruhnya tertahan pada jaringan akar (Marschner, 2012).

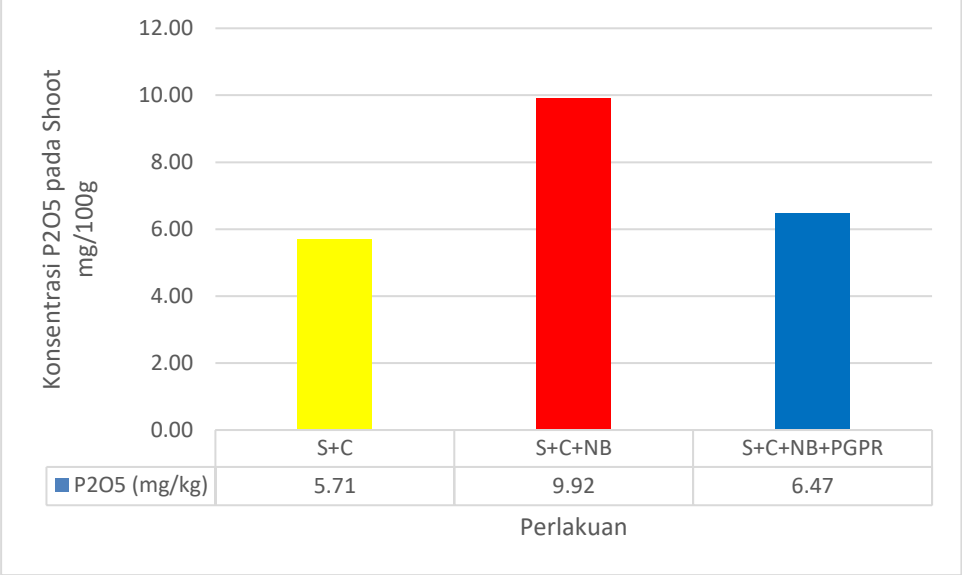
Sementara itu, perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan kandungan P akar sedikit lebih tinggi dibandingkan perlakuan S+C+NB, meskipun masih lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C. Hal tersebut mengindikasikan bahwa keberadaan PGPR diduga membantu meningkatkan penyerapan fosfor oleh akar, namun fosfor yang terserap tidak seluruhnya terakumulasi pada jaringan akar. Menurut Richardson et al. (2009), mikroorganisme di daerah rizosfer, termasuk PGPR, berperan dalam meningkatkan ketersediaan fosfor melalui proses pelarutan fosfat sehingga unsur tersebut lebih mudah diserap oleh tanaman.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan fosfor pada akar dipengaruhi oleh proses penyerapan dan

distribusi fosfor di dalam tanaman. Oleh karena itu, kandungan P yang lebih rendah pada akar tidak selalu menunjukkan rendahnya kemampuan tanaman menyerap fosfor, tetapi dapat mengindikasikan bahwa sebagian fosfor telah dimanfaatkan atau ditranslokasikan ke organ tanaman lainnya.

4.3.3. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Batang

Kandungan P_2O_5 pada batang *Melaleuca cajuputi* menunjukkan perbedaan pada setiap perlakuan. Perlakuan S+C+NB menghasilkan kandungan P_2O_5 tertinggi, yaitu 5,71 mg/100 g, diikuti perlakuan S+C+NB+PGPR sebesar 9,92 mg/100 g, sedangkan perlakuan S+C memiliki kandungan terendah, yaitu 6,47 mg/100 g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan nano biochar meningkatkan akumulasi fosfor pada jaringan batang dibandingkan perlakuan tanpa nano biochar. Berikut disajikan grafik konsentrasi P_2O_5 pada batang. Berikut disajikan gambar grafik konsentrasi (P_2O_5) pada batang :



Gambar 4. 7. Konsentrasi Fosfor (P_2O_5) pada Batang

Apabila dikaitkan dengan parameter sebelumnya, perlakuan S+C+NB memiliki kandungan P tersedia tanah tertinggi (32,11 mg/kg), sedangkan kandungan P pada akar relatif lebih rendah (10,55 mg/100 g) dan kandungan P pada batang justru menjadi yang tertinggi (9,92 mg/100 g). Kondisi ini diduga menunjukkan bahwa fosfor yang tersedia di dalam tanah tidak tertahan di akar, tetapi telah ditranslokasikan menuju batang. Fosfor

merupakan unsur yang bersifat mobile di dalam tanaman sehingga setelah diserap oleh akar, unsur tersebut dapat dipindahkan melalui jaringan xilem menuju organ tanaman yang membutuhkan untuk mendukung proses metabolisme dan pembentukan jaringan (Marschner, 2012).

Sebaliknya, pada perlakuan S+C, kandungan P pada akar merupakan yang tertinggi (15,65 mg/100 g), sedangkan kandungan P pada batang paling rendah (5,71 mg/100 g). Hal ini diduga karena sebagian fosfor masih tertahan pada jaringan akar sehingga jumlah fosfor yang ditranslokasikan ke batang menjadi lebih sedikit. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tingginya kandungan fosfor pada akar belum tentu diikuti oleh tingginya akumulasi fosfor pada batang karena distribusi fosfor di dalam tanaman dipengaruhi oleh proses translokasi antarorgan (Marschner, 2012).

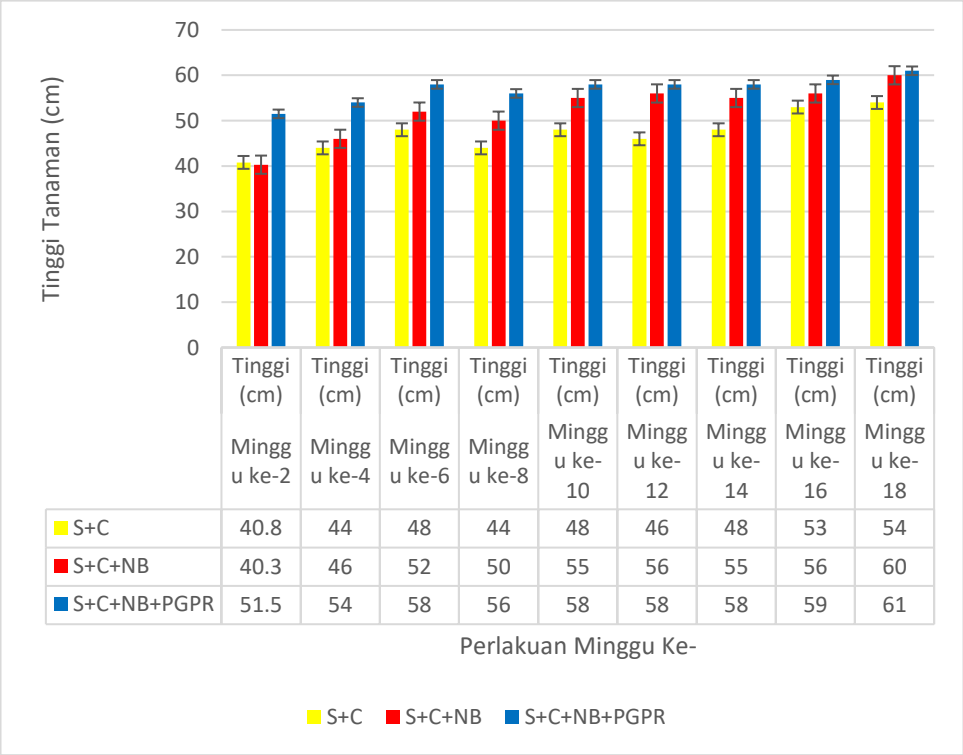
Sementara itu, perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan kandungan P batang lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C+NB, meskipun kandungan P pada akar sedikit lebih tinggi. Perbedaan ini diduga berkaitan dengan pengaruh PGPR terhadap dinamika penyerapan dan distribusi fosfor. PGPR diketahui mampu meningkatkan pelarutan fosfat melalui produksi asam organik dan enzim fosfatase sehingga fosfor lebih mudah diserap oleh tanaman. Namun, fosfor yang telah diserap tidak selalu terakumulasi pada satu organ, melainkan dapat didistribusikan ke berbagai jaringan sesuai kebutuhan fisiologis tanaman (Richardson et al., 2009). Karena penelitian ini hanya mengukur kandungan fosfor pada akar dan batang, distribusi fosfor pada organ lain, seperti daun atau pucuk, belum dapat diketahui secara pasti.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nano biochar meningkatkan akumulasi fosfor pada batang melalui peningkatan ketersediaan fosfor di dalam tanah, sedangkan penambahan PGPR diduga memengaruhi pola distribusi fosfor di dalam tanaman. Dengan demikian, kandungan fosfor pada batang tidak hanya ditentukan oleh jumlah fosfor yang tersedia di tanah, tetapi juga oleh proses penyerapan dan translokasi fosfor ke berbagai organ tanaman.

4.4. Potensi Bahan Pembenah Tanah terhadap Pertumbuhan Tanaman *Melaleuca cajuputi*

4.4.1. Tinggi Tanaman

Tinggi tanaman digunakan sebagai salah satu indikator untuk menilai respons pertumbuhan vegetatif *Melaleuca cajuputi* terhadap pemberian bahan pembenah tanah. Selama 18 minggu pengamatan, seluruh perlakuan menunjukkan peningkatan tinggi tanaman, namun besarnya peningkatan berbeda pada setiap perlakuan. Perlakuan S+C+NB+PGPR memberikan pertumbuhan tinggi terbaik sejak awal hingga akhir pengamatan. Pada minggu ke-2, tinggi tanaman telah mencapai 51,5 cm, sedangkan perlakuan S+C dan S+C+NB masing-masing hanya mencapai 40,8 cm dan 40,3 cm. Hingga minggu ke-18, tinggi tanaman pada perlakuan S+C+NB+PGPR meningkat menjadi 61 cm, sedikit lebih tinggi dibandingkan S+C+NB **(**60 cm**)** dan lebih tinggi daripada S+C **(**54 cm**).** Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi nano biochar dan PGPR mampu memberikan respons pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan perlakuan tanpa PGPR. Berikut disajikan grafik tinggi tanaman :



	Tinggi (cm) Minggu ke-2	Tinggi (cm) Minggu ke-4	Tinggi (cm) Minggu ke-6	Tinggi (cm) Minggu ke-8	Tinggi (cm) Minggu ke-10	Tinggi (cm) Minggu ke-12	Tinggi (cm) Minggu ke-14	Tinggi (cm) Minggu ke-16	Tinggi (cm) Minggu ke-18
S+C	40.8	44	48	44	48	46	48	53	54
S+C+NB	40.3	46	52	50	55	56	55	56	60
S+C+NB+PGPR	51.5	54	58	56	58	58	58	59	61

Gambar 4. 8. Grafik Tinggi Tanaman

Perbedaan tinggi tanaman tersebut diduga berkaitan dengan perubahan kondisi kimia tanah yang telah dibahas pada parameter sebelumnya. Perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan nilai pH tertinggi (5,00) sehingga kondisi tanah menjadi lebih sesuai untuk mendukung aktivitas akar dalam menyerap unsur hara. Pada tanah yang masam, fosfor umumnya mudah berikatan dengan besi (Fe) dan aluminium (Al) sehingga sulit dimanfaatkan oleh tanaman. Ketika pH meningkat, ikatan tersebut berkurang sehingga fosfor berada dalam bentuk yang lebih tersedia untuk diserap akar (Penn & Camberato, 2019).

Hasil analisis fosfor juga menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan pertumbuhan tanaman. Meskipun kandungan P_2O_5 tersedia pada tanah perlakuan S+C+NB+PGPR lebih rendah dibandingkan S+C+NB, kondisi tersebut diduga menunjukkan bahwa sebagian fosfor telah diserap oleh tanaman selama masa pertumbuhan. Fosfor merupakan unsur hara esensial yang berperan dalam pembentukan sistem perakaran, pembelahan sel, sintesis jaringan baru, serta proses transfer energi melalui ATP. Oleh karena itu, kecukupan fosfor berkontribusi terhadap berlangsungnya pertumbuhan vegetatif tanaman (Marschner, 2012).

Apabila dikaitkan dengan parameter merkuri, perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki kandungan Hg total tanah yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya, tetapi tetap menghasilkan pertumbuhan tinggi tanaman terbaik. Kondisi ini mengindikasikan bahwa keberadaan Hg pada media tanam belum memberikan pengaruh yang nyata terhadap pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*. Salah satu penyebabnya diduga karena PGPR mampu membantu tanaman beradaptasi terhadap cekaman logam berat melalui produksi fitohormon, siderofor, dan enzim ACC-deaminase yang mendukung perkembangan akar serta menjaga aktivitas fisiologis tanaman (Ma et al., 2016; Ojuederie & Babalola, 2017).

Selain meningkatkan kondisi kimia tanah, nano biochar juga berperan dalam memperbaiki sifat fisik tanah melalui peningkatan kapasitas menahan air, kapasitas tukar kation, serta penyediaan habitat bagi mikroorganisme di daerah perakaran. Di sisi lain, kompos menyediakan bahan organik dan

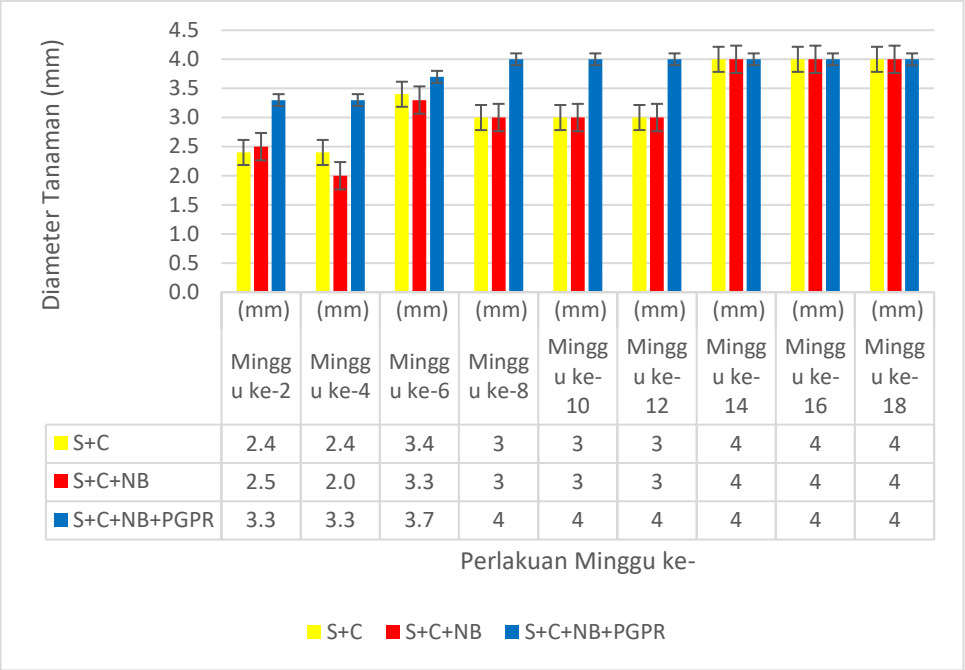
unsur hara yang dibutuhkan tanaman selama masa pertumbuhan. Sinergi ketiga bahan pembenah tersebut diduga menciptakan lingkungan tumbuh yang lebih baik sehingga pertumbuhan tinggi *Melaleuca cajuputi* menjadi lebih optimal (Lehmann & Joseph, 2015; Agegnehu et al., 2017).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi kompos, nano biochar, dan PGPR memberikan pengaruh paling baik terhadap pertumbuhan tinggi *Melaleuca cajuputi*. Peningkatan tersebut diduga berkaitan dengan perbaikan kondisi tanah, meningkatnya efisiensi pemanfaatan unsur hara, serta kemampuan tanaman beradaptasi pada tanah bekas tambang emas.

4.4.2. Diameter Tanaman

Diameter batang merupakan salah satu parameter pertumbuhan vegetatif yang mencerminkan perkembangan jaringan tanaman selama masa pertumbuhan. Berdasarkan hasil pengamatan selama 18 minggu, seluruh perlakuan menunjukkan peningkatan diameter batang, meskipun laju pertumbuhannya berbeda. Perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan diameter batang tertinggi sejak awal pengamatan hingga minggu ke-12. Pada minggu ke-2, diameter batang pada perlakuan S+C+NB+PGPR mencapai 3,3 mm, sedangkan perlakuan S+C dan S+C+NB masing-masing sebesar 2,4 mm dan 2,5 mm.

Selanjutnya, pada minggu ke-8 hingga minggu ke-12, diameter batang perlakuan S+C+NB+PGPR telah mencapai 4 mm, sementara perlakuan lainnya masih berada pada kisaran 3 mm. Memasuki minggu ke-14 hingga minggu ke-18, seluruh perlakuan menunjukkan diameter batang yang relatif sama, yaitu 4 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi nano biochar dan PGPR mampu mempercepat pertumbuhan diameter batang pada fase awal pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*. Berikut disajikan gambar grafik diameter tanama *Melaleuca Cajuputi* :



	(mm) Minggu ke-2	(mm) Minggu ke-4	(mm) Minggu ke-6	(mm) Minggu ke-8	(mm) Minggu ke-10	(mm) Minggu ke-12	(mm) Minggu ke-14	(mm) Minggu ke-16	(mm) Minggu ke-18
S+C	2.4	2.4	3.4	3	3	3	4	4	4
S+C+NB	2.5	2.0	3.3	3	3	3	4	4	4
S+C+NB+PGPR	3.3	3.3	3.7	4	4	4	4	4	4

Gambar 4. 9. Diameter Tanaman

Apabila dikaitkan dengan parameter sebelumnya, peningkatan diameter batang diduga berkaitan dengan perbaikan kondisi kimia tanah setelah pemberian bahan pembenah. Perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan nilai pH tertinggi sehingga kondisi tanah menjadi lebih mendukung bagi penyerapan unsur hara. Peningkatan pH pada tanah masam dapat mengurangi pengikatan fosfor oleh Fe dan Al, sehingga fosfor lebih mudah tersedia untuk dimanfaatkan tanaman (Penn & Camberato, 2019). Kondisi tersebut diduga mendukung pembentukan jaringan batang pada fase awal pertumbuhan.

Hasil analisis fosfor juga menunjukkan bahwa kandungan P_2O_5 tersedia di tanah pada perlakuan S+C+NB+PGPR lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C+NB. Kondisi tersebut diduga bukan disebabkan oleh rendahnya ketersediaan fosfor, melainkan karena sebagian fosfor telah dimanfaatkan oleh tanaman selama proses pertumbuhan. Fosfor berperan dalam pembelahan sel, pembentukan jaringan baru, dan perkembangan jaringan pembuluh sehingga kecukupan unsur tersebut berkontribusi terhadap pertambahan diameter batang (Marschner, 2012).

Selain itu, hasil analisis Hg menunjukkan bahwa perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki kandungan Hg total tanah dan Hg batang yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Meskipun demikian, pertumbuhan diameter batang tetap berlangsung dengan baik. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan PGPR diduga membantu tanaman beradaptasi terhadap cekaman logam berat melalui peningkatan aktivitas fisiologis dan perkembangan sistem perakaran. Beberapa bakteri PGPR diketahui menghasilkan fitohormon, siderofor, dan enzim ACC-deaminase yang berperan dalam mendukung pertumbuhan tanaman pada kondisi tanah yang terkontaminasi logam berat (Ma et al., 2016; Ojuederie & Babalola, 2017).

Di samping itu, nano biochar berkontribusi dalam memperbaiki sifat fisik tanah melalui peningkatan kapasitas menahan air, kapasitas tukar kation, serta penyediaan habitat bagi mikroorganisme di daerah perakaran. Sementara itu, kompos menyediakan bahan organik dan unsur hara yang dibutuhkan tanaman selama masa pertumbuhan. Kombinasi ketiga bahan pembenah tersebut diduga menciptakan lingkungan tumbuh yang lebih baik sehingga pertumbuhan diameter batang berlangsung lebih cepat pada fase awal (Lehmann & Joseph, 2015; Agegnehu et al., 2017).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi kompos, nano biochar, dan PGPR memberikan respons yang lebih baik terhadap pertumbuhan diameter batang *Melaleuca cajuputi*, terutama pada fase awal pertumbuhan. Perbaikan tersebut diduga berkaitan dengan meningkatnya kualitas media tanam, pemanfaatan unsur hara yang lebih efisien, serta kemampuan tanaman beradaptasi terhadap kondisi tanah bekas tambang.

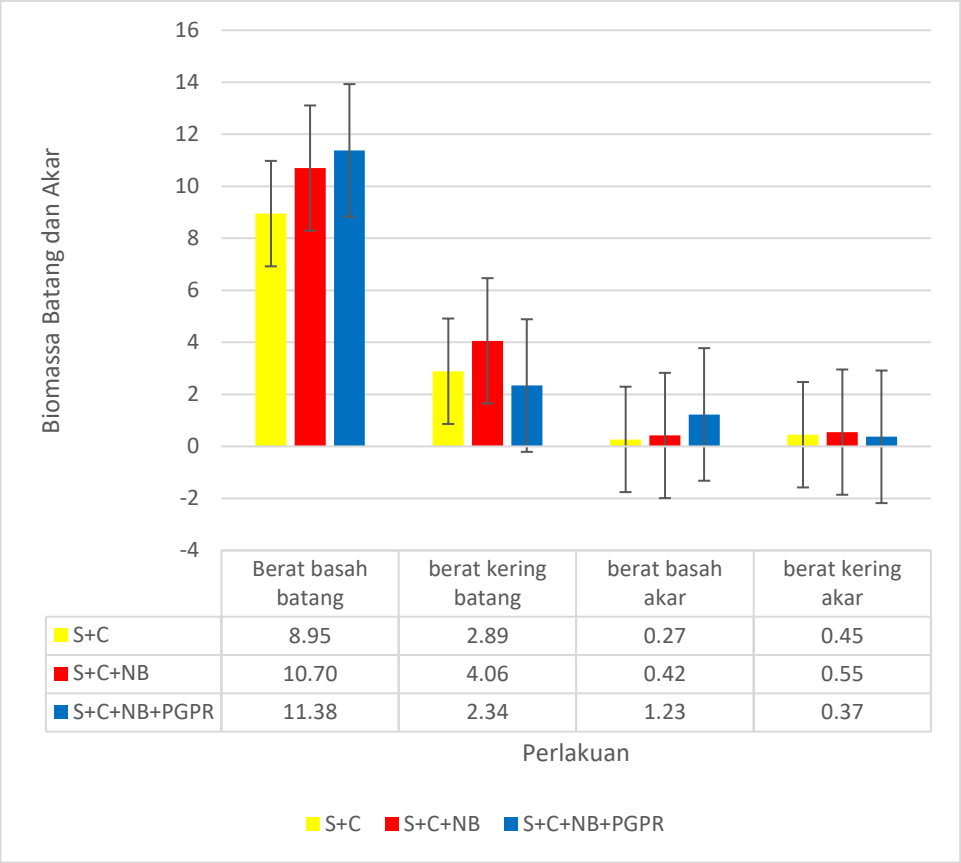
Perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan respons pertumbuhan diameter yang lebih cepat diduga karena adanya aktivitas PGPR yang meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara oleh tanaman. PGPR diketahui mampu menghasilkan fitohormon, seperti auksin, giberelin, dan sitokinin, yang berperan dalam merangsang perkembangan sistem perakaran serta meningkatkan pembelahan dan pembesaran sel pada

jaringan batang. Dengan demikian, tanaman mampu membentuk batang yang lebih cepat pada fase awal pertumbuhan (Vacheron et al., 2013). Meskipun pada akhir pengamatan seluruh perlakuan memiliki diameter yang relatif sama, perlakuan S+C+NB+PGPR mencapai ukuran tersebut lebih awal, yang menunjukkan bahwa kombinasi kompos, nano biochar, dan PGPR lebih efektif dalam mempercepat pertumbuhan awal *Melaleuca cajuputi* pada tanah bekas tambang emas rakyat.

4.4.3. Biomassa Batang dan Akar

Biomassa merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menggambarkan akumulasi hasil pertumbuhan tanaman selama masa penelitian. Biomassa terbentuk dari hasil fotosintesis yang dipengaruhi oleh kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara dari media tanam. Oleh karena itu, pengukuran biomassa dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh pemberian kompos, nano biochar, dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap pertumbuhan *Melaleuca cajuputi* pada tanah bekas tambang emas rakyat.

Berdasarkan Gambar grafik dbawah ini, biomassa batang menunjukkan respons yang berbeda pada setiap perlakuan. Berat basah batang meningkat dari 8,95 g pada perlakuan S+C, menjadi 10,70 g pada perlakuan S+C+NB, dan mencapai nilai tertinggi pada perlakuan S+C+NB+PGPR, yaitu 11,38 g. Sebaliknya, berat kering batang tertinggi diperoleh pada perlakuan S+C+NB sebesar 4,06 g, diikuti perlakuan S+C sebesar 2,89 g, sedangkan perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan nilai terendah, yaitu 2,34 g. Pada biomassa akar, berat basah mengalami peningkatan dari 0,27 g pada perlakuan S+C, menjadi 0,42 g pada perlakuan S+C+NB, dan mencapai 1,23 g pada perlakuan S+C+NB+PGPR. Sementara itu, berat kering akar tertinggi juga diperoleh pada perlakuan S+C+NB sebesar 0,55 g, kemudian diikuti perlakuan S+C sebesar 0,45 g, sedangkan perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki nilai 0,37 g. Berikut disajikan gambar grafik biomassa tanaman uji *Melaleuca Cajuputi* :



	Berat basah batang	berat kering batang	berat basah akar	berat kering akar
S+C	8.95	2.89	0.27	0.45
S+C+NB	10.70	4.06	0.42	0.55
S+C+NB+PGPR	11.38	2.34	1.23	0.37

Gambar 4. 10. Grafik biomassa tanaman

Apabila dikaitkan dengan parameter sebelumnya, tingginya biomassa basah pada perlakuan S+C+NB+PGPR diduga berkaitan dengan kondisi media tanam yang lebih baik setelah pemberian nano biochar dan PGPR. Perlakuan tersebut menghasilkan nilai pH tertinggi sehingga kondisi tanah menjadi lebih mendukung bagi aktivitas akar dalam menyerap air dan unsur hara. Selain itu, nano biochar diketahui memiliki porositas yang tinggi dan luas permukaan yang besar sehingga mampu meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air. Kondisi tersebut menyebabkan tanaman memperoleh suplai air yang lebih baik selama pertumbuhan sehingga biomassa basah meningkat (Lehmann & Joseph, 2015; Agegnehu et al., 2017).

Hasil tersebut juga sejalan dengan pembahasan tinggi dan diameter tanaman, dimana perlakuan S+C+NB+PGPR menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang lebih baik dibandingkan perlakuan lainnya. Perbaikan kondisi tanah melalui peningkatan pH serta lingkungan perakaran yang

lebih mendukung diduga meningkatkan kemampuan tanaman dalam memanfaatkan unsur hara untuk menunjang pertumbuhan. Pada parameter fosfor sebelumnya juga diketahui bahwa kandungan P_2O_5 tersedia di dalam tanah pada perlakuan S+C+NB+PGPR lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C+NB. Kondisi tersebut diduga menunjukkan bahwa sebagian fosfor telah dimanfaatkan oleh tanaman selama proses pertumbuhan. Fosfor berperan penting dalam pembelahan sel, pembentukan jaringan baru, perkembangan sistem perakaran, serta transfer energi dalam bentuk ATP sehingga berkontribusi terhadap pertumbuhan biomassa tanaman (Marschner, 2012).

Di sisi lain, pola yang berbeda terlihat pada biomassa kering. Meskipun perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan berat basah batang dan akar tertinggi, berat kering batang maupun akar justru lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C+NB. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan berat basah tidak selalu diikuti oleh peningkatan akumulasi bahan kering. Berat basah dipengaruhi oleh kandungan air di dalam jaringan tanaman, sedangkan berat kering menggambarkan akumulasi bahan organik yang terbentuk setelah seluruh air dihilangkan melalui proses pengeringan. Dengan demikian, tingginya biomassa basah pada perlakuan S+C+NB+PGPR diduga lebih dipengaruhi oleh tingginya kandungan air dalam jaringan tanaman dibandingkan akumulasi bahan kering (Taiz et al., 2018).

Apabila dikaitkan dengan parameter merkuri, perlakuan S+C+NB+PGPR memiliki kandungan Hg total tanah dan Hg batang yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya, namun kondisi tersebut tidak menghambat pertumbuhan biomassa tanaman. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi nano biochar dan PGPR mampu memperbaiki kondisi media tanam sehingga tanaman tetap dapat tumbuh dengan baik meskipun berada pada tanah yang masih mengandung merkuri. Nano biochar berperan dalam mengurangi mobilitas logam berat melalui proses adsorpsi, sedangkan PGPR membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman logam berat melalui peningkatan aktivitas fisiologis dan

perkembangan sistem perakaran (Ma et al., 2016; Ojuederie & Babalola, 2017).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian kompos, nano biochar, dan PGPR memberikan respons yang berbeda terhadap biomassa *Melaleuca cajuputi*. Perlakuan S+C+NB+PGPR menghasilkan biomassa basah batang dan akar tertinggi, sedangkan biomassa kering batang dan akar tertinggi diperoleh pada perlakuan S+C+NB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi nano biochar dan PGPR lebih berperan dalam meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan kandungan air jaringan tanaman, sedangkan nano biochar tanpa PGPR menghasilkan akumulasi bahan kering yang lebih tinggi.

4.5. Analisis Efisiensi Penggunaan Bahan Pembenan Tanah

Analisis efisiensi penggunaan bahan pembenah tanah pada penelitian ini dilakukan berdasarkan efektivitas setiap kombinasi perlakuan dalam memperbaiki kualitas tanah sekaligus mendukung pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*. Analisis ini tidak didasarkan pada perhitungan biaya ekonomi, melainkan pada perbandingan antara jumlah bahan yang digunakan dengan hasil yang diperoleh pada parameter pH tanah, kandungan merkuri (Hg), fosfor (P_2O_5), serta pertumbuhan tanaman.

Berdasarkan hasil penelitian, perlakuan S+C+NB dinilai sebagai kombinasi yang paling efisien untuk tujuan remediasi tanah. Penambahan nano biochar mampu meningkatkan nilai pH dibandingkan kondisi awal, mempertahankan kandungan P_2O_5 tersedia paling tinggi, serta membantu mempertahankan Hg di dalam tanah melalui proses imobilisasi. Karakteristik biochar yang memiliki luas permukaan tinggi, pori yang berkembang, serta gugus fungsi aktif memungkinkan logam berat terikat lebih stabil di dalam media tanah sehingga mobilitasnya menjadi lebih rendah (Lehmann & Joseph, 2015; Beesley et al., 2011). Selain itu, biomassa kering batang dan akar tertinggi juga diperoleh pada perlakuan S+C+NB, yang menunjukkan bahwa akumulasi bahan kering tanaman berlangsung lebih baik dibandingkan perlakuan lainnya.

Berbeda dengan perlakuan tersebut, kombinasi S+C+NB+PGPR memberikan respons pertumbuhan tanaman paling baik yang ditunjukkan oleh

tinggi tanaman, diameter batang, serta biomassa basah tertinggi. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penambahan PGPR lebih berperan dalam meningkatkan aktivitas fisiologis tanaman dibandingkan memperbaiki kualitas tanah secara langsung. PGPR diketahui mampu menghasilkan senyawa pemacu tumbuh, seperti fitohormon, siderofor, dan enzim ACC-deaminase yang membantu perkembangan akar serta meningkatkan kemampuan tanaman beradaptasi terhadap kondisi tanah yang mengalami cekaman logam berat (Ma et al., 2016; Ojuederie & Babalola, 2017). Pada penelitian ini, peningkatan aktivitas fisiologis tersebut diduga menyebabkan pemanfaatan fosfor oleh tanaman menjadi lebih tinggi sehingga kandungan P_2O_5 yang tersisa di dalam tanah lebih rendah dibandingkan perlakuan S+C+NB.

Secara keseluruhan, apabila tujuan utama penelitian adalah remediasi tanah bekas tambang emas, maka kombinasi kompos dan nano biochar (S+C+NB) dapat dianggap sebagai perlakuan yang paling efisien karena telah mampu memperbaiki sifat kimia tanah, mempertahankan ketersediaan fosfor, membantu mengimobilisasi merkuri, serta menghasilkan biomassa kering tertinggi tanpa memerlukan tambahan PGPR. Sebaliknya, apabila tujuan utama adalah meningkatkan pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*, maka kombinasi S+C+NB+PGPR menjadi pilihan yang lebih sesuai karena memberikan respons pertumbuhan vegetatif terbaik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas penggunaan bahan pembenah tanah bergantung pada tujuan penerapannya, apakah lebih difokuskan pada perbaikan kualitas tanah atau pada peningkatan pertumbuhan tanaman.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai potensi kombinasi kompos, nano biochar, dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap kualitas tanah dan pertumbuhan *Melaleuca Cajuputi* pada tanah bekas tambang emas rakyat di Kulon Progo**,** dapat disimpulkan bahwa:

1. Kombinasi kompos, nano biochar, dan PGPR memberikan pengaruh terhadap kualitas tanah pascatambang. Perlakuan S+C+NB menunjukkan potensi terbaik dalam perbaikan kualitas tanah berdasarkan peningkatan pH, kandungan P_2O_5 tersedia tertinggi, dan kandungan Hg akar yang lebih rendah.
2. Perlakuan S+C+NB+PGPR memberikan respons pertumbuhan *Melaleuca cajuputi* terbaik, ditunjukkan oleh tinggi tanaman, diameter batang, dan biomassa yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disampaikan beberapa saran sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan perawatan tanaman dengan sebaik mungkin dengan memperhatikan banyaknya air yang sesuai untuk penyiraman tanaman.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk teliti setiap semua penimbangan tanaman uji yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

Pratiwi, D.Y. (2020). *Dampak Pencemaran Logam Berat (Timbal, Tembaga, Merkuri, Kadmium, Krom) terhadap Organisme Perairan dan Kesehatan Manusia*. *Jurnal Akuatek, 1(1), 59 - 6*. https://jurnal.unpad.ac.id/akuatek/article/download/28135/13485

Herianto, A., et al., (2019). *Uji beberapa sifat fisika tanah bekas tambang emas tanpa izin (PETI) d tiga kecamatan d daratan sepanjang Sungai Kuantan*. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika (Juatika)*, 1 (1), 19 - 31. https://doi.org/10.36378/juatika.v1i1.41

Romadhan, P.A., et al., (2022). *Perbaikan Sifat Kimia Lahan Bekas Tambang Emas Melalui Aplikasi Biochar Sekam Padi dan Pupuk Kandang Ayam*. Agrotrop: J*ournal on Agriculture Science, 12 (1), 19 - 1009.*

Hamzah, A., et al (2019). *Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat*. UNITRI Press, Malang.

Chen,J., et al,m (2012). *Mercury toxicity, molecular response and tolerance in higher plants. Biometals*, 25, 847 - 857. https://link.springer.com/article/10.1007/s10534-012-9560-8

Shofi, M. (2017). *Pengaruh Logam Berat Merkuri (Hg) terhadap Pertumbuhan Tanaman*. *Jurnal Wiyata*, 4(1). https://ojs.iik.ac.id/index.php/wiyata/article/download/93/102

Nuriman, M., et al., (2025). *Bio-Reclamation Evaluation of Former Gold Mine Land: Pre- and Post-Reclamation Soil Management Conditions*. Jurnal Biologi Tropis, 25(3), 2457-2464. https://jurnalfkip.unram.ac.id/index.php/JBT/article/view/9519

Juliarti, A., et al., (2023). *Pertumbuhan Kayu Putih (Melaleuca Cajuputi) di Lahan Bekas Tambang Batubara dengan Aplikasi Pupuk Kompos*.

Andriani, R., et al., (2021). *Peanut Pods (Arachis hypogaea L.) in Ex-Mining Limestone Soil Enriched with Indigenous Bacteria*. https://jurnal.radenfatah.ac.id/index.php/biota/article/view/7008

Haviz, M., et al. (2022). *Pengaruh Penambahan Biochar dari Lignite pada Tanah Bekas Penambangan Batubara terhadap Potensi Immobilisasi Logam Seng (Zn).* https://jtii.eng.unila.ac.id/index.php/ojs/article/view/34

Tito, E. (2025). *Potensi Kompos dan Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) pada Capsicum frutescens L. di Tanah Bekas Tambang Emas di Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta*. Program Studi Teknik Lingkungan. dspace.uii.ac.id. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/60443

Kusuma R.K, et al. (2017). *Kajian Kandungan Logam Berat di Lokasi Penambangan Emas Tradisional di Desa Sangon, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo. Prosiding Seminar Nasional XII. Departemen Teknik Geologi*. Universitas Gadjah Mada

Suhadi, et al. (2023). *Penyuluhan Pengolah tanah Limbah Pertambangan Emas Rakyat di Desa Lopok, Kabupaten Sumbawa*. Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat. Volume 3 Nomor 2 Agustus 2023.

Zahran P.N. (2025). *Potensi Kompos, Arbuscular Mycorrhizal Fungi, dan Plant Growth Promoting Rhizobacteria Untuk Remediasi Tanah Bekas Pengotanah Tambang Emas Rakyat di Kabupaten Kulon Progo*. Program studi Teknik Lingkungan. dspace.uii.ac.id. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/60663

Jiang M, et al. (2023). *Nanobiochar for the remediation of contaminated soil and water: chall and opportunities*. Jieng et al. Biochar

Paradise Mycelia. (2023). *Dampak Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan pada Penambangan Emas Skala Kecil di Kulonprogo*. Jurnal Inovasi Pertambangan dan Lingkungan Vol. 3, No. 1, Tahun 2023 : 1– 9. https://journal.uinjkt.ac.id/index.php/jipl

Tawakal B. 2025. *Analisis Aplikasi PGPR terhadap Kualitas Tanah Bekas Tambang Emas dengan Kombinasi Kompos dan Sekam pada Pertumbuhan Tanaman Capsicum frutescens L.* Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. dspace.uii.ac.id. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/60663

Mujianto Megasari G, dkk. 2022. *Studi Kelayakan Tambang dalam Perencanaan Kegiatan R4 : Restorasi, Remediasi, Reklamasi, dan Rehabilitasi pada Tambang Andesit Feldspar Gunung Ragas, Desa Clering, Kabupaten Jepara*. Jurnal Geoains dan Teknologi. Volume 5 Nomer 2, Juli 2022.

Panjaitan, et al. 2018. *Pemanfaatan Biochar dan Konsorsium Bakteri untuk Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat serta Uji Tanaman Sawi (Brassica Juncea L.).*

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Methodist Indonesia. Jurnal agroteknologi dan ilmu pertanian.

Destania F, et al. 2022. *Kajian Perbaikan Sifat Fisika dan Kimia Tanah Pasca Tambang menggunakan metode composting berbahan dasar sampah organic dengan variasi activator mol dan EM4*. Program Studi Teknik Ligkungan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat. Jukung Jurnal Teknik Lingkungan, 8 (1): 32-39, 2022.

Agus Cahyono, et al. 2014. *Peran Revegetasi Terhadap Restorasi Tanah Pada Lahan Rehabilitas Tambang Batubara Di Daerah Tropika*. Fakultas Kehutanan UGM Yogyakarta. J. MANUSIA DAN LINGKUNGAN, Vol. 21, No.1, Maret 2014: 60-66

Mustafa M, et al. 2022. *Evaluasi Kesuburan Tanah Pada Lahan Pasca Tambang Nikel Laterit Sulawesi Tenggara. Program Doktor Ilmu Kebumian dan Lingkungan Universitas Hasanuddin*. Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan 13 (1), (2022). 52 – 56

Gusmini., et al. (2024). *Aplikasi Biokanat Guna Memperbaiki Sifat Kimia dan Menanggulani Kontaminan Merkuri di Tanah Bekas Tambang Emas*. Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 29(2), 251 - 258.

Backer Rachel et al., 2018. *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms og Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. Frontiers in Plant Science*.

Abukari Ammal et al., 2022. *A comprehensive riview of the effects of biochar on soil physicochemical properties and crop productivity*.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.

Vacheron Jordan et al., 2013. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. Frontiers in Plant Science.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Plant Physiology and Development* (7th ed.). Sinauer Associates.

Tesfaye Futsum et al., 2021. *Could biochar amendment be a tool to improve soil availability and plant uptake of phosphorus?* Environmental Science and Pollution Research.

Glaser & Lehr (2019). *Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis*. Scientific Reports

Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). *Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms.* Plant and Soil, 321, 305–339.

Vessey, J. K. (2003). *Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers.* Plant and Soil, 255, 571–586.

Vessey, J. K. (2003). *Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers.* Plant and Soil, 255, 571–586.

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., et al. (2015). *Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions.* Chemosphere, 125, 70–85.

Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., et al. (2011). *A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils.* Plant and Soil, 337, 1–18.

Ma, Y., Rajkumar, M., Rocha, I., Oliveira, R. S., & Freitas, H. (2016). *Plant growth promoting bacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils.* Biotechnology Advances, 34(5), 707–718.

Ojuederie, O. B., & Babalola, O. O. (2017). Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 14*(12), 1504.

Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology, 119*, 156–170.

Ali, A., Guo, D., Mahar, A., Wang, P., Shen, F., Li, R., Zhang, Z., & Wang, Q. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria improve plant growth under heavy metal stress: Mechanisms and applications. *Chemosphere, 307*, 135694.

Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture, 9*(6), 120.

Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, *321*(1–2), 305–339.

Ma, Y., Rajkumar, M., Zhang, C., & Freitas, H. (2016). Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, *174*, 14–25.

Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, *118*, 536–544.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Persiapan tanah



Lampiran 2 Dokumentasi Tanaman



Lampiran 3 Dokumentasi Pengukuran

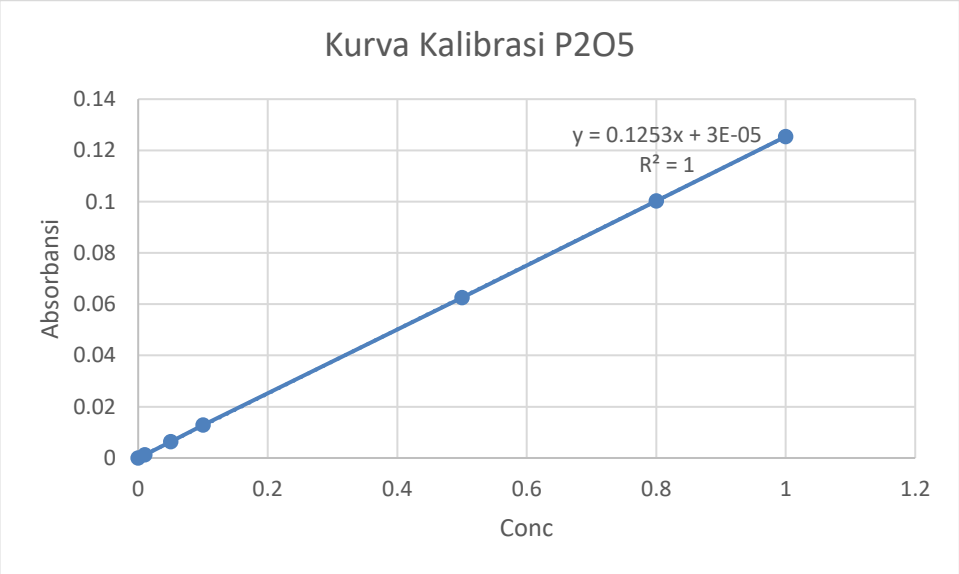


Lampiran 4 Dokumentasi Pemanenan



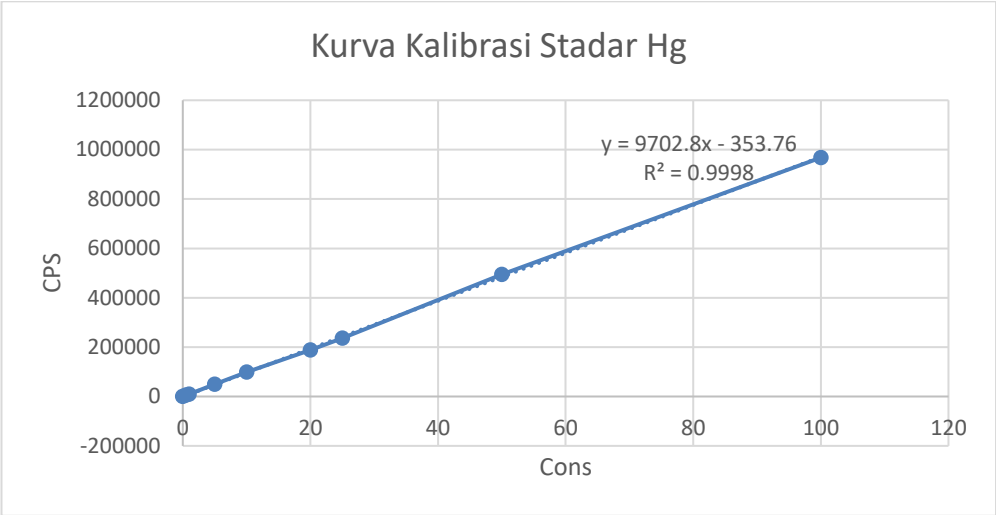
Lampiran 5. Kurva Kalibrasi (P_2O_5)

Standar	Cons (ppm)	ABS
Standar 1	0	0
Standar 2	0,01	0,0012
Standar 3	0,05	0,0063
Standar 4	0,1	0,0128
Standar 5	0,5	0,0625
Standar 6	0,8	0,1003
Standar 7	1	0,1254
Slope	0,12530881	
Intercept	0,0000343	



Lampiran 6. Kurva Kalibrasi Standar Hg

Standar	Cons (ug/L)	CPS
Standar 1	0	0
Standar 2	0,5	4950,8
Standar 3	1	9900,7
Standar 4	5	49504,0
Standar 5	10	98824,5
Standar 6	20	188144,2
Standar 7	25	236056,2
Standar 8	50	493795,7
Standar 9	100	967784,6
Slope	9702,8107	
Intercept	-353,7594	

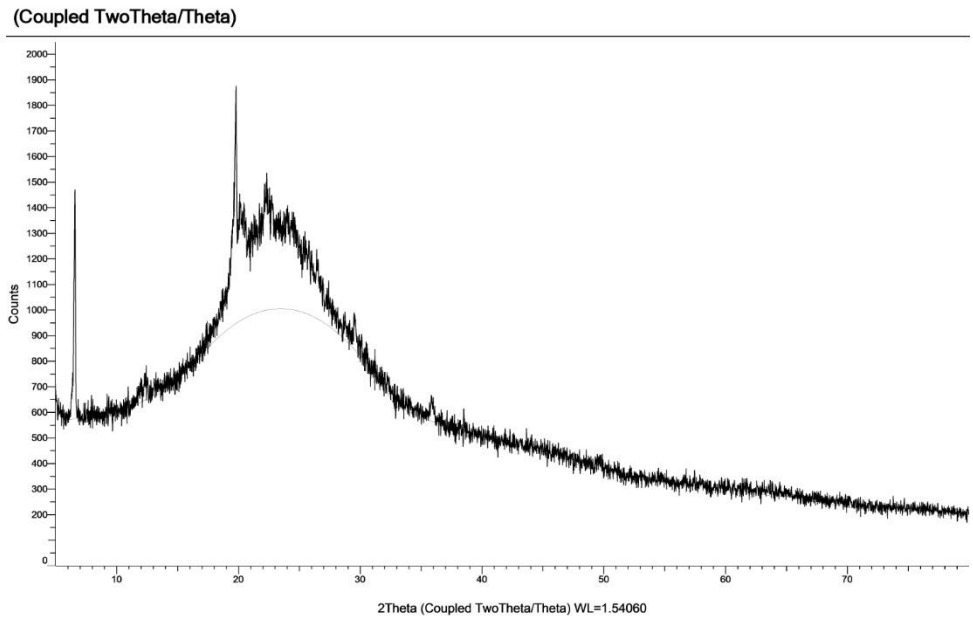


Lampiran 7. Contoh Perhitungan

Kode	Abs	Fp	Ppm Kurva	Kadar P Tanah (mg/kg)
S+C	0,066	20	0,744	44,30
Rumus	-	-	$\left(\frac{Abs-Intercept}{Slope}\right) x\ fp$	$ppm\ kurva\ x\ \left(\frac{ml\ ekstrak}{1000\ ml}\right)$ $x\ 100\ gr\ x\ fp\ x\ \left(\frac{142}{190}\right) x\ fk$

Lampiran 8. Grafik XRD

17081025-1 A1.raw, 11/10/2025 3:49:05 PM



17081025-1 A1.raw, 11/10/2025 3:51:05 PM

Peak List #1

Visible	Icon	Color	Index	Name	Parent	Caption (display)	Scan	Angle	d Value
Yes			1	Peak #1	Peak List #1	6.579 °	17081025-1 A1.raw #1	6.579 °	13.42456 Å
Yes			2	Peak #2	Peak List #1	12.359 °	17081025-1 A1.raw #1	12.359 °	7.15612 Å
Yes			3	Peak #3	Peak List #1	19.798 °	17081025-1 A1.raw #1	19.798 °	4.48076 Å
Yes			4	Peak #4	Peak List #1	20.156 °	17081025-1 A1.raw #1	20.156 °	4.40204 Å
Yes			5	Peak #5	Peak List #1	20.467 °	17081025-1 A1.raw #1	20.467 °	4.33588 Å
Yes			6	Peak #6	Peak List #1	22.319 °	17081025-1 A1.raw #1	22.319 °	3.98009 Å
Yes			7	Peak #7	Peak List #1	22.737 °	17081025-1 A1.raw #1	22.737 °	3.90778 Å
Yes			8	Peak #8	Peak List #1	26.468 °	17081025-1 A1.raw #1	26.468 °	3.36480 Å
Yes			9	Peak #9	Peak List #1	29.569 °	17081025-1 A1.raw #1	29.569 °	3.01863 Å
Yes			10	Peak #10	Peak List #1	33.038 °	17081025-1 A1.raw #1	33.038 °	2.70917 Å
Yes			11	Peak #11	Peak List #1	35.892 °	17081025-1 A1.raw #1	35.892 °	2.49997 Å

Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	h,k,l	Match
891	1465	97.4%	n.a.	No
94.6	743	10.3%	n.a.	No
915	1862	100.0%	n.a.	No
462	1420	50.5%	n.a.	No
443	1409	48.4%	n.a.	No
474	1473	51.8%	n.a.	No
442	1445	48.4%	n.a.	No
189	1155	20.7%	n.a.	No
128	971	14.0%	n.a.	No
83.5	703	9.1%	n.a.	No
71.2	636	7.8%	n.a.	No

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama SHEILA APRILIA PUTRI. Penulis menempuh pendidikan tinggi di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia sejak tahun 2022. Selama masa perkuliahan, penulis merupakan penerima Beasiswa Atlet Universitas Islam Indonesia atas prestasi di bidang karate. Penulis juga merupakan pendiri sekaligus Ketua Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Karate Universitas Islam Indonesia, serta aktif dalam berbagai kegiatan organisasi dan pengembangan prestasi Karate, penulis telah melaksanakan program magang di Perumda Air Minum (PDAM)**,** Pusat Pengendalian Lingkungan Hidup (Pusdal LH) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan**,** serta PT Wijaya Karya (Persero) Tbk pada Proyek RE-MWRD, Kalimantan Timur. Pengalaman tersebut memperkuat minat penulis pada bidang pengelolaan lingkungan, keselamatan dan kesehatan kerja (K3), serta rehabilitasi lahan bekas tambang. Sebagai syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik, penulis menyusun Tugas Akhir yang berjudul "Potensi Kombinasi Kompos, Nano Biochar, dan Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan *Melaleuca cajuputi* pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo."