TA/TL/2026/2130

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Potensi *Nano Biochar*, *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), dan Kompos Pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo, Yogyakarta

Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti
22513003

Dosen Pembimbing I : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., 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 Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), and Compost on Post-Artisanal Gold Mining Soil in Kulon Progo, Yogyakarta

Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti
22513003

Supervisor I : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.
Supervisor II : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Civil Engineering, Design, and Innovation
Universitas Islam Indonesia
2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Potensi *Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo, Yogyakarta

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.

Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti

22513003

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 24 Agustus 2026 dan disetujui oleh:

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

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., (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

[redacted], 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, 28 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti

22513003

PRAKATA

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Proses penyusunan tugas akhir ini tentunya tidak terlepas dari dukungan dan kasih sayang dari berbagai pihak.

Dalam perjalanan penyelesaikan tugas akhir ini, banyak pihak yang uturt membantu serta memberikan doa dan dukungan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan, serta doa, sehingga penulisan tugas akhir ini dapat berjalan dengan lancar. Ucapan terima kasih yang mendalam penulis sampaikan kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan izin, pertolongan, raahmat, karunia serta hidayah-Nya sehingga penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dan dukungan dalam setiap langkah penulis.
3. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D., dan Puji Lestari, S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing, serta Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji yang dengan tulus telah memberikan bimbingan, arahan, serta meluangkan waktu dan kesempatan bagi penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah membekalipenulis dengan ilmu yang berharga.
5. Seluruh staff Laboratorium Teknik Lingkungan FTDI UII.
6. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan hingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang membangun. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak.

Sleman, 30 Juli 2026

Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti

Potensi Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) dan Kompos pada Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat di Kulon Progo, Yogyakarta

Mahasiswa	: Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti
NIM	: 22513003
Program Studi	: Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing I	: Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.
Pembimbing II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc.,

Abstrak

Penambangan emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, meninggalkan lahan dengan kadar merkuri (Hg) tinggi, tanah masam, dan bahan organik rendah. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi *nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), dan kompos terhadap perbaikan kualitas tanah bekas tambang emas dan pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*. Penelitian dilaksanakan pada skala rumah kaca menggunakan polybag dengan tiga perlakuan, yaitu tanah dan kompos (S+C), tanah, *nanobiochar*, dan kompos (S+NB+C), serta tanah, nanobiochar, kompos, dan AMF (S+NB+C+M), masing-masing empat ulangan selama 18 minggu. Merkuri dianalisis dengan ICP-MS, sedangkan fosfor dengan spektrofotometri. Hasil penelitian menunjukkan S+NB+C+M merupakan kombinasi terbaik. Perlakuan tersebut mencapai pH media tertinggi (4,88 dibanding 4,25 pada S+C), kadar merkuri terndah pada akar (12,45 mg/kg dibanding 23,70 mg/kg) dan batang (9,66 mg/kg), serta pertumbuhan terbaik dengan pertambahan tinggi 23,5 cm, pertambahan diameter 2,0 mm, dan biomassa kering batang 4,25 g. kenaikan merkuri media hingga 148,13 mg/kg yang disertai penurunan merkuri akar menunjukka terjadinya imobilisasi merkuri pada fase padat, sehingga kombinasi *nanobiochar*, AMF, dan kompos bekerja melalui mekanisme fitostabilisasi sekaligus mendukung pertumbuhan *Melaleuca cajuputi*.

Kata kunci: *Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)*, kompos, *Melaleuca cajuputi*, merkuri, *nanobiochar*

Potential of ninobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), and Compost on Post-Artisanal Gold Mining Soil in Kulon Progo, Yogyakarta

Student	: Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti
Student Number	: 22513003
Study Program	: Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor I	: Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.
Supervisor II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc.,

Abstract

Artisanal gold mining in Kokap District, Kulon Progo, Special Region of Yogyakarta, Leaves land with high mercury (Hg), acidic soil, and low organic matter. This study analyses the potential of nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), and compost for improving post-gold mining soil quality and supporting Melaleuca cajuputi growth. The experiment was conducted at greenhouse scale using ppolybags with three treatments: soil and compost (S+C), soil, nanobiochar, and compost (S+NB+C), and soil, nanobiochar, compost, and AMF (S+NB+C+M), each with four replication over 18 weeks. Mercury was analysed by ICP-MS and phosphorus by spectrophotometry. The results show that S+NB+C+M was the best combination. This treatment achieved the highest media pH (4.88 compared with 4.25 in S+C), the lowest mercury in the roots (12.45 mg/kg compared with 23.70 mg/kg) and in the shoot (9.66 mg/kg), and the best growth response with a height increment 0f 23.5 cm, a diameter increment of 2.0 mm, and a shoot dry biomass of 4.25 g. the rise in media mercury to 148.13 mg/kg a accompained by the fall in root mercury indicates mercury immobilisation in the solid phase, so the combinastion of nanobiochar, AMF, and compost works through phytostabilitatsion while also supporting Melaleuca cajuputi growth.

Key words: Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), compost, Melaleuca cajuputi, mercury, nanobiochar

DAFTAR ISI

PRAKATA v
Abstrak vii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR TABEL xii
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR LAMPIRAN xiv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Ruang Lingkup 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Pertimbangan Emas Skala Kecil dan Dampak Lingkungannya 6
2.2 Tanah Bekas Tambang 7
2.2.1 Merkuri (Hg) 8
2.2.2 Derajat Keasaman (pH) 9
2.2.3 Fosfor (P) 10
2.2.4 Karakteristik Tanah Tambang 11
2.3 Remediasi Lahan Terkontaminasi Logam Berat 13
2.3.1 *Nano Biochar* 14
2.3.2 *Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)* 15
2.3.3 Kompos 15
2.4 *Melaleuca cajuputi* 16
2.5 Penelitian Terdahulu 17
BAB III 23
METODE PENELITIAN 23
3.1 Waktu dan Lokasi 23

3.2 Alat dan Bahan 24
3.2.1 Alat 24
3.2.2 Bahan 25
3.3 Tahapan Penelitian 26
3.4 Persiapan Media Tanam 28
3.5 Penanaman dan Inokulasi AMF 29
3.6 Perawatan dan Pengamatan 30
3.7 Pemanenan 31
3.8 Analisis Data 32
3.9 Proses Analisa Data 33
3.9.1 Perhitungan logam berat merkuri (Hg) 33
3.9.2 Perhitungan kandungan P_2O_5 34
BAB IV 36
4.1 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap pH Media Tanam 36
4.2 Pengaruh Bahan Pembenah Tnah Terhadap Reduksi Logam Merkuri (Hg) 38
4.2.1 Konsentrasi Hg pada Media Tanam 38
4.2.2 Konsentrasi Hg pada Jaringan Tanaman 40
4.3 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Ketersediaan dan Serapan Fosfor (P) 42
4.3.1 Konsentrasi P2O5 pada Media Tanam 42
4.3.2 Konsentrasi pada Jaringan Tanaman 43
4.4 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Pertumbuhan Tanaman Uji 45
4.4.1 Tinggi Tanaman dan Diameter Batang 45
4.4.2 Biomassa Tanaman Uji 48
BAB V PENUTUP 50
5.1 Kesimpulan 50
5.2 Saran 51
DAFTAR PUSTAKA 53
LAMPIRAN 58

Lampiran 58
Lampiran 64
RIWAYAT HIDUP 69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu 17

Tabel 3. 1 Alat..... 24
Tabel 3. 2 Bahan 25
Tabel 3. 3 Daftar Kode Perlakuan..... 29

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran pH Media Tanam..... 36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tanaman Melaleuca cajuputi 17

Gambar 3. 1 Peta Lokasi Titik Sampling..... 24
Gambar 3. 2 Prosedur Uji Analisis 27
Gambar 3. 3 Proses Pencampuran Tanah Bekas Tambang dan Pembenah Tanah..... 28
Gambar 3. 4 Proses Penanaman..... 29
Gambar 3. 5 Proses Innokulasi AMF..... 30
Gambar 3. 6 Perawatan da Pengamatn Tanaman..... 31
Gambar 3. 7 Pemanenan Tanaman 32
Gambar 3. 8 Pengujian Sampel..... 33

Gambar 4. 1 Nilai pH Tanah..... 36
Gambar 4. 2 Konsentrasi Hg tanah..... 39
Gambar 4. 3 Konsentrasi Hg Batang 41
Gambar 4. 4 Konsentrasi Hg Akar..... 41
Gambar 4. 5 Grafik Hasil Pengujian Konsentrasi P2O5 Tanah..... 43
Gambar 4. 6 Grafik Hasil Pengujian P2O5 Batang 44
Gambar 4. 7 Grafik Hasil Pengujian P2O5 Akar..... 44
Gambar 4. 8 Pertumbuhan Tinggi Tanaman..... 46
Gambar 4. 9 Pertumbuhan Diameter Tanaman..... 47
Gambar 4. 10 Biomassa Basah dan Kering Tanaman Uji 48

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kurva Kalibrasi 52
Lampiran 2 Dokumentasi Kegiatan 54

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Emas adalah salah satu hasil tambang yang paling bernilai dan menjadi sumber penghasilan penting bagi banyak masyarakat di Indonesia. Kegiatan penambangan emas dalam skala kecil atau tradisional sudah berlangsung turun-temurun dan berperan besar dalam menopang perekonomian masyarakat setempat (Santoso dkk., 2018). Salah satu daerah yang memiliki potensi tambang emas tradisional cukup besar adalah Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY).

Hasil penelitian di kawasan Kalirejo, Kulon Progo menunjukkan bahwa kadar merkuri di dalam tailing tambang emas tradisional mencapai 164,49 hingga 383,21 mg/kg, jauh di atas ambang batas yang diizinkan pemerintah yaitu sebesar 0,3 mg/kg (Karisma dkk., 2021). Kondisi ini menyebabkan kerusakan lahan bekas tambang dari sisi fisik, kimia, maupun biologi secara serius. Lahan yang rusak ini memiliki kandungan bahan organik yang sangat rendah, kadar logam berat yang tinggi, dan aktivitas mikroorganisme tanah yang sangat minim, sehingga tidak bisa dimanfaatkan secara produktif dan membutuhkan upaya pemulihan yang menyeluruh (Chandra dkk., 2023).

Dampak dari pencemaran logam berat di lahan bekas tambang emas tidak hanya dirasakan oleh lingkungan, tetapi juga berdampak langsung pada kesehatan masyarakat dan keberlangsungan hidup ekosistem setempat. Paparan logam berat seperti merkuri dan timbal melalui rantai makanan, air minum yang tercemar, maupun kontak langsung dengan tanah dapat menyebabkan gangguan kesehatan yang serius pada masyarakat sekitar, termasuk kerusakan sistem saraf, gangguan fungsi ginjal, dan berbagai penyakit kronis lainnya (Tchounwou et al., 2012). Dari sisi ekologi, hilangnya keanekaragaman hayati tanah, rusaknnya struktur fisik lahan, serta menurunnya produktivitas lahan secara drastis menjadikan kawasan

bekas tambang sebagai lahan kritis yang tidak dapat dimanfaatkan secara produktif dalam jangka panjang apabila tidak segera ditangani. Oleh karena itu, upaya pemulihan lahan bekas tambang bukan sekedar kebutuhan ekologis, melainkan juga merupakan tanggung jawab sosial dan kesehatan masyarakat yang mendesak untuk dilakukan.

Salah satu cara yang terbukti efektif untuk memulihkan lahan bekas tambang adalah dengan menanam kembali (revegetasi) menggunakan jenis tanaman yang mampu bertahan di tanah yang rusak. Meleuca cajuputi atau kayu putih adalah tanaman asli Indonesia yang sudah terbukti bisa tumbuh di lahan bekas tambang batu bara meski tanahnya bersifat asam dan miskin unsur hara (Juliarti dkk., 2022). Kajian terhadap perkebunan kayu putih di lahan bekas tambang PT Bukit Asam, Sumatera Selatan, memperlihatkan bahwa Melaleuca cajuputi tahan terhadap genangan, sesuai dikembangkan di lahan marginal bekas tambang, dan menguntungkan secara ekonomi karena menghasilkan minyak atsiri kayu putih (Wijayanti dkk., 2016). Tanaman ini pun telah digunakan oleh beberapa perusahaan tambang di Indonesia dalam program pemulihan lahan pascatambang (Narendra dan Pratiwi, 2021). Keunggulan ganda yang dimiliki Melaleuca cajuputi, yaitu manfaat ekologis sekaligus nilai ekonomis dari produksi minyak atsiri, menjadikannya pilihan yang tepat untuk program revegetasi lahan bekas tambang di Kulon Progo. Meskipun demikian, pertumbuhan tanaman di lahan yang tercemar logam berat tetap memerlukan bantuan perbaikan kondisi tanah agar tanaman bisa tumbuh dengan baik.

Nanobiochar adalah salah satu bahan pembenah tanah yang kini banyak diteliti di bidang remediasi lingkungan. Dibandingkan biochar biasa, nanobiochar memiliki ukuran partikel yang sangat kecil (di bawah 100 nm) sehingga luas permukaannya jauh lebih besar, daya katalitiknya lebih tinggi, dan kemampuan bergerak di dalam tanah pun lebih baik (Ramanayaka dkk., 2022). Penelitian oleh Liu dkk. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan nanobiochar secara nyata mampu mengurangi toksisitas kadmium (Cd) dan mendorong pertumbuhan tanaman di tanah yang tercemar, sekaligus meningkatkan jumlah dan keragaman mikroorganisme tanah. Cara kerja

nanobiochar dalam mengikat logam berat di tanah melibatkan penyerapan elektrostatik, pertukaran ion, pengikatan permukaan, dan kopresipitasi (Zhang dkk., 2022), sehingga menjadikannya kandidat yang sangat potensial untuk pemulihan lahan bekas tambang emas.

Selain nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) juga dikenal sebagai agen biologis yang efektif untuk membantu pemulihan lahan tercemar logam berat. AMF hidup bersimbiosis dengan akar tanaman dan bekerja melalui dua cara: secara langsung dengan menyerap logam berat ke dalam struktur jamurnya dan menguncinya melalui sekresi glomalin, serta secara tidak langsung dengan meningkatkan penyerapan hara, biomassa, dan ketahanan tanaman terhadap tekanan logam berat (Riaz dkk., 2021). Kajian meta-analisis oleh Frontiers in Environmental Science (2024) yang merangkum lebih dari 250 artikel ilmiah membuktikan bahwa pemberian AMF secara nyata mampu menurunkan kadar logam Pb, Cd, Cu, dan Ni di tanah bekas tambang. AMF juga menghasilkan glomalin yang berfungsi sebagai perekat agregat tanah, sehingga memperbaiki struktur fisik tanah dan mendukung keberhasilan revegetasi (Riaz dkk., 2021).

Kompos sebagai bahan organik yang sudah matang juga memiliki peran yang tidak bisa diabaikan dalam pemulihan lahan yang rusak. Penambahan kompos di lahan bekas tambang terbukti bisa meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, dan menyediakan unsur hara yang dibutuhkan tanaman (Wang dkk., 2021). Kompos mengandung asam humat yang mampu mengikat berbagai logam berat seperti Cd, Cr, Cu, dan Pb melalui mekanisme pengikatan kimia, sehingga logam-logam tersebut menjadi tidak mudah terserap tanaman (Alvarenga dkk., 2009, dalam Shareen dkk., 2019). Sebuah studi di lahan bekas tambang di Missouri, Amerika Serikat, menunjukkan bahwa pemberian kompos secara signifikan memperbaiki kondisi kesehatan tanah dari segi fisik, kimia, dan biologi, serta mendorong terbentuknya tutupan vegetasi yang lebih baik dibandingkan lahan yang tidak mendapat perlakuan (Umeobi et al., 2025).

Berdasarkan uraian di atas, ketiga bahan pembenah tanah yaitu nanobiochar, AMF, dan kompos masing-masing telah terbukti mampu memperbaiki kualitas tanah yang rusak dan mendukung pertumbuhan tanaman. Namun, kajian mengenai efektivitas kombinasi ketiganya secara bersamaan, khususnya pada kondisi lahan bekas tambang emas yang tercemar merkuri di Kulon Progo, masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk dilakukan guna mengkaji potensi kombinasi nanobiochar, AMF, dan kompos dalam memperbaiki kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan Melaleuca cajuputi di lahan bekas tambang emas, sebagai upaya mencari solusi pemulihan lahan kritis yang inovatif dan berkelanjutan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, berikut beberapa rumusan masalah yang diangkat pada penelitian ini :

1. Bagaimana potensi bahan pembenah tanah seperti *Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos terhadap perbaikan kualitas tanah bekas tambang?
2. Bagaimana potensi bahan pembenah tanah seperti *Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos terhadap pertumbuhan tanaman *Melaleuca cajuputi*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu, sebagai berikut :

1. Menganalisis potensi bahan pembenah tanah seperti *Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos, terhadap perbaikan kualitas tanah dan mengurangi tingkat pencemaran tanah.
2. Menganalisis potensi bahan pembenah tanah seperti *Nanobiochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos, terhadap pertumbuhan tanaman *Melaleuca cajuputi*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan solusi terkait potensi bahan pembenah tanah seperti *Nano Biochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos terhadap pertumbuhan tanaman *Melaleuca cajuputi.*
2. Bahan studi literatur terkait potensi bahan pembenah tanah seperti *Nano Biochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos terhadap perbaikan kualitas tanah.

1.5 Ruang Lingkup

Batasan pembahasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilaksanakan mulai dari April 2026 hingga September 2026
2. Pemantauan pertumbuhan tanaman dilakukan dalam skala rumah kaca
3. Jenis tanaman yang digunakan yakni *Melaleuca cajuputi*
4. Penelitian potensi bahan pembenah tanah seperti *Nano Biochar, Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan Kompos terhadap perbaikan kualitas tanah.

.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pertimbangan Emas Skala Kecil dan Dampak Lingkungannya

Pertambangan emas skala kecil atau *artsanal and small-scale gold mining* (ASGM) merupakan kegiatan ekstraksi mineral yang dilakukan oleh individu maupun kelompok masyarakat dengan modal terbatas dan peralatan yang sederhana tanpa dukungan teknologi industri berskala besar. Di seluruh dunia, sektor ini menyerap lebih dari 15 juta tenaga kerja langsuung dan menjadi sumber penghidupan bagi sekitar 100 juta orang, terutama di negara-negara berkembang di Afrika, Amerika Latin, dan Asia Tenggara (Hilson & McQuilken, 2014). Di Indonesia, kegiatan ASGM telang berlangsung secara turun temurun di berbagai wilayah dan telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari struktur ekonomi masayarakat pedesaan di daerah-daerah yang memiliki cadangan mineral. Salah satu wilayah yang memiliki tradisi pertambangan emas yang panjang adalah Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, yang juga menjadi lokasi utama penelitian ini.

Metode yang paling umum digunakan dalam ASGM adalah amalgamasi, yakni proses pencampuran bijih emas yang telah dihaluskan dengan merkuri cair untuk membentuk amalgam padat, yang kemudian dipanaskan untuk memisahkan emas dari merkuri melalui penguapan. Proses ini dipilih secara luas karena biayanya relatif rendah, bahan-bahannya mudah diperoleh, dan dapat dilakukan tanpa memerlukan peralatan canggih maupun tenaga ahli terlatih (Drace et al., 2012). Namun demikian, penggunaan merkuri secara masif tanpa disertai sistem pengelolaan limbah yang memadai mengakibatkan pencemaran serius pada tanah, sedimen sungai, dan badan air di sekitar area tambang. Uap merkuri yang dihasilkan selama proses pemanasan amalgam juga membahayakan kesehatan para pekerja dan masyarakat yang tinggal di sekitar lokasi pengolahan emas.

Dampak lingkungan dari kegiatan ASGM di kawasan Kokap telah terdokumentasi melalui berbagai penelitian ilmiah yang menunjukkan tingkat

pencemaran yang mengkhawatirkan. Penelitian yang dilakukan di kawasan Kalirejo membuktikan bahwa limbah proses amalhamasi telah mencemari Sungai Plampang dan Sungai Sangon dengan kadar logam berat yang melampaui baku mutu lingkungan yang ditetapkan pemerintah Indonesia (Dewi, 2017). Selain kontaminasi pada badan perairan, degradasi fisik tanah akibat kegiatan penggalian dan penambangan tanpa disertai program reklamasi turut memperparah kondisi ekologis kawasan ini secara keseluruhan. Akumulasi dampak-dampak tersebut menjadikan lahan bekas tambang di kawasan Kokap sebagai salah satu prioritas yang mendesak untuk mendapatkan penanganan remediasi yang menyeluruh dan berbasis ilmu pengetahuan.

Dari perspektif sosial hingga ekonomi, meskipun ASGM memberikan kontribusi nyata terhadap pendapatan masyarakat lokal, beban lingkungan yang ditinggalkan kegiatan ini jauh melampaui manfaat ekonomi jangka pendeknya. Biaya pemulihan lahan bekas tambang secara ekologis seringkali lebih besar daripada nilai ekonomi emas yang berhasil diekstraksi, terutama jika memperhitungkan dampak kesehatan masyarakat dan kerugian jasa ekosistem yang hilang. Kondisi ini mendorong perlunya pendekatan rehabilitasi lahan yang tidak hanya efektif secara ekologis, tetapi juga dapat memberikan nilai ekonomi jangka panjang bagi masyarakat sekitar. Revegetasi menggunakan tanaman bernilai ekonomi seperti *Melaleuca cajuputi* menjadi salah satu strategi yang menjawab kebutuhan tersebut secara simultan.

2.2 Tanah Bekas Tambang

Tanah bekas tambang emas umumnya mengandung berbagai jenis logam berat yang bersifat toksik, persisten, dan tidak dapat terurai secara biologis dalam kondisi alami. Sifat-sifat tersebut menjadikan logam berat sebagai kontaminan yang sangat berbahaya, baik bagi organisme tanah, pertumbuhan vegetasi, maupun kesehatan manusia elalui jalur rantai makanan dan paparan langsung. Keberadaan logam berat dalam konsentrasi tinggi di tanah juga dapat menekan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan krusial dalam proses dekomposisi bahan organik dan siklus hara. Beberapa logam berat

yang paling dominan ditemukan di lahan bekas tambang emas meliputi merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) yang masing-masing memiliki karakteristik toksikologi dan perilaku geokimia yang berbeda (Tchounwou et al., 2012).

2.2.1 Merkuri (Hg)

Merkuri merupakan logam berat yang sangat beracun dan secara khusus bersosiasi erat dengan kegiatan pertambangan emas menggunakan metode amalgamasi di seluruh dunia. Di lingkungan akuatik, merkuri anorganik yang terlarut dapat mengalami transformasi menjadi metilmerkuri melalui aktivitas bakteri anaerob, suatu senyawa organomerkuri yang jauh lebih toksik dan mudah terakumulasi dalam jaringan organisme hidup melalui proses biomagnifikasi rantai makanan. Paparan metilmerkuri secara kronis pada manusia telah terbukti menikmbulkan kerusakan sistem saraf pusat yang permanen, gangguan fungsi ginjal yang progresif, serta risiko teratogenik yang serius pada janin dalam kandungan (UNEP, 2019). Kasus-kasus keracunan merkuri seperti yang pernah terjadi di Teluk Minamata, Jepang, menjadi peringatan keras bagi pentingnya pengendalian penggunaan dalam kegiatan pertambangan.

Di dalam tanah, merkuri berkaitan dengan partikel organik dan mineral anorganik sehingga mobilitasnya sangat dipengaruhi oleh kondisi pH, kandungan bahan organik, dan potensial redoks tanah. Pada tanah asam dengan kandungan bahan organik tinggi, merkuri cenderung membentu kompleks organomerkuri yang lebih mudah terlarut dan berpindah ke badan air melalui aliran permukaan maupun limpasan hujan. Keberadaan merkuri dalam tanah pada konsentrasi tinggi secara langsung menghambat ektivitas enzim tanah, terutama enzim yang mengandung gugus sulfhidril, sehingga proses biokimia tanah terganggu secara fundamental. Gangguan pada aktivitas mikrobiologi tanah ini menyebababkan penurunan kapasitas pemulihan tanah secara alami dan memperpanjang durasi degradasi yang dibutuhkan untuk mencapai konndisi normal (UNEP, 2019).

2.2.2 Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman atau pH merupakan ukuran banyaknya ion hydrogen (H^+) yang berada di dalam larutan tanah. Nilainya dinyatakan pada skala 0 sampai 14 dan bersifat logaritmik, sehingga perbedaan satu satuan pH sebenarnya mewakili perbedaan konsentrasi H^+ sampai sepuluh kali lipat. Pengukuran yang paling umum dilakukan menggunakan pelarut akuades dan hasilnya disebut pH H_2O, yaitu gambaran keasaman aktif berupa H^+ yang benar-benar berada di larutan tanah dan langsung bersendtuhan dengan permukaan akar. Tanah bekas tambang emas umumnya tergolong masam. Kondisi tersebut terbentuk dari beberapa proses yang berjalan bersamaan, yaitu teroksidasinya mineral sulfida yang terangkat ke permukaan selama panggilan sehingga menghasilkan asam sulfat, terkelupasnya lapisan atas tanah yang membuat cadangan bahan organic sebagai penyangga ikut hilang, serta tertinggalnya sisa bahan kimia dari proses pengolahan bijih di dalam tailing (Chandra et al., 2023).

Rendahnya pH tidak berdiri sendiri, melainkan menjadi pemicu bagi persoalan-persoalan lain di dalam tanah. Pada kondisi masam, aliminium yang semula terikat aman di dalam mineral liat akan terlepas menjadi ion Al^{3+} yang terlarut, dan bentuk inilah yang bersifat racun bagi tanaman (Sari et al., 2017). Sasaran utamanya adalah jaringan meristem di ujung akar yang sedang aktif membelah, sehingga akar menjadi pendek, menebal, dan kehilangan Sebagian kemampuannya menyerap air maupun hara seperti fosfor dan kalsium (Hidayati et al., 2018). Selain aluminium, logam berat lain juga lebih mudah larut dan berpindah ketika pH turun, sehingga risiko terangkatnya logam ke jaringan tanaman maupun tercucinya logam ke badan air ikut meningkat. Di sisi yang berlawanan, unsur hara justru menjadi sulit dijangkau tanaman, karena fosfor pada tanah masam cenderung terikat oleh aluminium dan besi membentuk senyawa yang sukar larut, sehingga kadar totalnya bisa saja tinggi tetapi bagian yang benar-benar tersedia sangat sedikit.

Dampak pH rendah juga terasa pada sisi biologi dan fisika tanah. Sebagian besar bakteri dan fungi pengurai bekerja optimal pada kisaran pH mendekati netral, sehingga kondisi yang terlalu masam menekan populasi

maupun aktivitasnya. Akibatnya perombakan bahan organic berjalan lambat, pasokan hara dari proses mineralisasi berkurang, dan pembentukan agregat tanah yang biasanya dibantu aktiviitas organisme ikut terhambat. Bahan organic yang minim pada akhirnya membuat kapasitas tukar kation tanah menjadi rendah, sehingga tanah kehilangan kemampuan menahan hara dan pupuk yang diberikan mudah tercuci Bersama air. Rangkaian ini menjelaskan mengapa pH sering diposisikaan sebagai indicator kunci pada lahan bekas tambang, sebab satub parameter tersebut menghubungkan aspek kimia, biologi, dan fisika tanah sekaligus.

Sebagian besar tanaman budidaya tumbuh paling bai pada kisaran pH 5,5 sampai 7,0 sementara tanah bekas tambang emas kerap berada jauh dibawah kisaran tersebut. Beberapa jenis tanaman memang lebih toleran terhadap kondisi masam, dan kayu putih (Melaleuca cajuputi) termasuk di dalamnya, namun toleransi tersebut hanya membuat tanaman mampu bertahan dan bukan berarti pertumbuhannya menjadi optimal. Upaya memperbaiki pH karenanya menjadi langkah awal yang penting dalam rehabilitasi lahan. Penambahan bahan organic seperti kompos maupun bahan berkarbon seperti biochar diketahui mampu menaikkan pH sekaligus mengikat aluminium sehingga daya racunnya menurun (Utami et al., 2019).

2.2.3 Fosfor (P)

Fosfor (P) adalah salah satu unsur hara makro yang paling dibutuhkan oleh tanaman dalam proses pertumbuhan, namun ketersediaannya di tanah bekas tambang emas sangat rendah akibat berbagai gangguan proses kimia dan biologi tanah. Di dalam tanah, fosfor tersedia bagi tanaman terutama dalam bentuk ion ortofosfat yang terlarut dalam laruta tanah, namun pada lahan bekas tambang yang bersifat masam dan kaya logam berat seperti Fe dan Al, fosfor cenderung terikat kuat membentuk senyawa besi fosfat dan aluminium fosfat yang tidak larut sehingga tidak dapat diserap tanaman (Sims dan Sharoley, 2005). Kondisi pH tanah yang rendah di lahan bekas tambang memperparah pengikat fosfor ini, sehingga meskipun kadar fosfor total di tanah mungkin cukup, kadar fosfir yang tersedia bagi tanaman tetap sangat rendah dan menjadi pembatas utama pertumbuhan tanaman.

Kekurangan fosfor yang tersedia di tanah bekas tambang berdampak langsung pada pertumbuhan tanaman dalam beberapa cara. Pertama, fosfor merupakan komponen utama adenosin trifosfat (ATP) yang merupakan sumber energi utama untuk seluruh proses metabolisme tanaman, sehingga kekurangannya menghambat hampr semua proses pertumbuhan secara bersamaan. Kedua, fosfor berperan penting dalam pembentukan membran sel, sintesis asam mukleat, dan perkembangan sistem perakaran yang kuat, sehingga definisinya menyebabkan akar pendek dan lemah yang yang tidak mampu mengeksplorasi tanah secara efektif. Penambahan bahan pembenah tanah seperti nanobiochar, AMF, dan kompos dalam penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan ketersediaan fosfor melalui meningkatkan pH tanah, penyediaan fosfat orga nik, dan peningkatan aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat, sehingga tanaman Melaluca Cajuputi dapat tumbuh optimal di lahan bekas tambang (Sims dan Sharpley, 2005).

2.2.4 Karakteristik Tanah Tambang

Kerusakan lahan bekas tambang emas tidak hanya dilihat dari satu sisi saja, melainkan mencakup tiga aspek utama yaitu fisika, kimia, dan biologi tanah yang saling berkaitan satu sama lain. Secara fisika, kegiatan penggalian dan pengolahan tailing menyebabkan struktur tanah menjadi rusak, padat, dan kehilangan agregat yang baik akibat hilangnya lapisan top soil yang karya bahan organik. Tanah yang padat ini memiliki porositas rendah sehingga kemampuannya menyimpan air dan udara menjadi terbatas, akibatnya akar tanaman kesulitan menembus tanah dan menyerap unsur hara secara optimal (Chandra dkk., 2023). Selain itu, tekstur tanah bekas tambang umumnya didominasi oleh fraksi pasir kasar dari sisa pengolahan tailing, sehingga daya pegang air (water holding capacity) menjadi sangat rendah dann tanaman lebih mudah mengalami kekeringan meski curah hujan cukup tinggi.

Secara kimia, tanah bekas tambang emas dicirikan oleh pH yang sangat rendah atau bersifat masam, akibat proses oksidasi mineral sulfida yang menghasilkan asam sulgat selama proses penambangan berlangsung. Kondisi pH rendah ini berdampak luas terhadap kelarutan berbagai unsur dalam tanah, baik unsur hara maupun logam berat. Pada pH masam, logam-

logam seperti aluminium dan logam berat lainnya menjadi lebih larut dan tersedia dalam bentuk ion bebas yang toksik, sementara unsur hara penting seperti fosfor justru terikat dan menjadi tidak tersedia bagi tanaman, sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Selain pH yag rendah, kandungan bahan organik di tanah bekas tambang juga sangat minim karena hilangnya lapisan humus pada saat pengupasan lahan, sehingga kapasitas tukar kation (KTK) tanah menajdi rendah dan kemampuan tanah dalam menahan unsur hara semakin berkurang (Chandra dkk., 2023).

Secara biologi, rendahnya pH dan tingginya kadar logam berat pada tanah bekas tambang menekan keberadaan dan aktivitas mikroorganisme tanah seperti bakteri, fungi, dan mikroba pelarut hara lainnya. Mikroorganisme tanah sebenarnya memegang peran penting dalam siklus hara, dekomposisi bahan organik, serta pembentukan struktur tanah yang baik, namun kondisi lahan yang ekstrem membuat populasi mikroorganisme ini sulit berkembang sehingga proses-proses biologis tersebut tidak dapat berjalan dengan semestinya (Tchounwou et al., 2012). Minimnya aktivitas biologi tanah pada akhirnya berdampak langsung pada rendahnya biomassa tanaman yang dapat tumbuh di lahan tersebut, karena tanaman tidak memperoleh dukungan hara dan kondisi perakaran yang memadai untuk tumbuh secara optimal.

Ketiga aspek fisika, kimia, dan biologi tanah tersebut pada dasarnya tidak berdiri sendiri, melainkan saling berkaitan dan membentuk siklus yang dapat memperparah maupun memperbaiki kondisi lahan secara keseluruhan. pH tanah menjadi salah satu indikator kunci yang menghubungkan ketiga aspek ini, karena pH yang rendah akan meningkatkan kelarutan logam berat (aspek kimia), menekan aktivitas mikroorganisme tanah (aspek biologi), dan dalam jangka panjang turut memperburuk struktur fisik tanah akibat minimnya aktivitas organisme yang berperan dalam pembentukan agregat tanah. Kondisi-kondisi ini pada akhirnya bermuara pada rendahnya biomassa, baik biomassa mikroba tanah maupun biomassa tanaman yang tumbuh di atasnya, sehingga produktivitas lahan secara keseluruhan menurun drastis. Oleh karena itu, upaya peningkatan pH tanah melalui penambahan bahan

pembenah seperti nano biochar, AMF, dan kompos pada penelitian ini menjadi langkah strategis, sebab perbaikan pH diharapkan dapat memicu perbaikan secara simultan pada kondisi kimia, biologi, dan pada akhirnya peningkatan biomassa tanaman *Melaleuca cajuputi* yang ditanam di lahan bekas tambang.

2.3 Remediasi Lahan Terkontaminasi Logam Berat

Remediasi tanah yang terkontaminasi logam berat merupakan upaya sistematis dan terencana untuk memulihkan fungsi ekologis tanah yang rusak melalui serangkaian pendekatan ilmiah yang mencakup metode fisik, kimia, biologis, atau kombinasi dari ketiganya. Akhir-akhir ini pendekatan biologis semakin diminati oleh para peneliti dan praktisi di bidang lingkungan karena dinilai lebih ramah lingkungan, biaya lebih rendah, tidak menghasilkan limbah sekudner yang berbahaya, dan lebih berpotensi memberikan pemulihan jangka panjang yang berkelanjutan dibandingkan metode fisika, kimaa, konvensional seperti solidifikasi, penggalian tanah, atau pencucian kimia (Vidali, 2016). Bioremediasi memanfaatkan kapasitas metabolik mikroorganisme tanah unutk mengurai, mengimobilisasi, atau mengubah kontaminan menjadi bentuk yang kurang toksik melalui berbagai mekanisme biokimia. Sementara itu, fitoremediasi menggunakan kemampuan alami tanaman untuk mengekstraksi, mendegradasi, atau menstabilkan logam berat dari dalam tanah, baik melalui mekanisme fitoekstraksi, fitostabilisasi, maupun rizoofiltrasi.

Efektivitas pendekatan biologis dalam remediasi tanah sangat bergantung pada pemilihan organisme yang tepat sesuai dengan jenis kontaminan, karakteristik fisikokimia tanah, kondisi iklim setempat, serta tujuan akhir penggunaan lahan pasca remediasi. Pada lahan bekas tambang emas yang mengalami kontaminasi logam berat seperti di Kokap, Kulon Progo, pendekatan terpadu yang menggabungkan ahan pembenah tanah berbasis nano dengan inokulasi mikoriza dan penanaman spesies pohon toleran logam berat dianggap sebagai strategi yang paling efektif. Strategi ini juga memiliki keunggulan dalam memadukan fungsi ekologis dan ekonomis secara bersamaan, sehingga lebih mudah diterima dan diimplementasikan

oleh masyarakat sekitar kawasan tambang (Vidali, 2016).

2.3.1 Nano Biochar

Biochar adalah produk residu karbon padat yang dihasilkan dari proses pirolisis biomassa seperti sekam padi, tempurung kelapa, kayu, atau limbah pertanian lainnya pada suhu tinggi antara 300-700°C di bawah kondisi oksigen yang sangat terbatas atau tidak sama sekali. *Nano biochar* merupakan versi berukuran sangat kecil yaitu dibawah 100 nm yang memiliki luas permukaan dan kemampuan adsorpsi jauh lebih tinggi dibanding biochar biasa. Kemampuan ini membuatnya efektif dalam menigkat logam berat seperti Pb, Cd, dan Hg did alam tanah melalui adsorpsi, pertukaran ion, dan kompleksasi permukaan, sekaligus memperbaiki pH, struktur, dan kesuburan tanah (Ramanayaka et al., 2020). Meskipun demikian, keamanan jangka panjang penggunan nanopartikel di lingkungan masih perlu terus dikaji.

Nanobiochar yang digunakan pada penelitian ini juga dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk memastikan struktur dan ukuran partikelnya, dengan hasil yang disajikan pada Lampiran 1. Difaktogram yang diperoleh didominasi oleh puncak melebar (borad hump) pada rentang 2θ sekitar 20–30° dengan intensitas maksimum di kisaran 22-24°. Pola seperti ini merupakan ciri khas bahan berkarbon amorf atau turbostratik, yaitu susunan lapisan aromatic yang belum tertata serapi grafit, dan umum ditemukan pada biochar hasil pirolisis suhu sedang. Di atas puncak melebar tersebut masih terbaca sejumlah puncak tajam berintensitas rendah, antara lain pada 2θ = 6,579°; 12,359°; 19,798°; 20,467°; 22,319°; 26,468°; dan 29,569° yang berturut-turut setara dengan jarak antarbidang (d) sebesar 13,42 Å; 7,16 Å; 4,48 Å; 4,34 Å; 3,98 Å; 3,36 Å; dan 3,02 Å. Puncak pada 26,468° dengan d = 3,36 Å yang kemungkinan berasal dari tumpukan lapisan aromatic bidang (002) sekaligus dari silika sisa bahan baku, sedangkan puncak-puncak pada sudut rendah menunjukka masih adanya fase mineral berlapis yang terbawa dari biomassa asal maupun dari fraksi abu hasil pirolisis.

Perhitungan ukuran kristalit terhadap puncak-puncak tersebut menghasilkan nilai berkisar antara 275,1 A sampai 778,5 A atau setara

dengan 27,5 nm sampai 77,9 nm, dengan rata-rata sekitar 50 nm. Seluruh nilai tersebut berada di bawah 100 nm, sehingga bahan yang digunakan telah memenuhi kriteria ukuran nano sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Dominasi struktur amorf yang disertai ukuran kristalit pada skala nano merupakan kombinasi yang menguntungkan untuk keperluan remediasi. Struktur yang tidak teratur menyisakan banyak cacat permukaan dan gugus fungsi aktif seperti karboksil dan fenolik, sementara ukuran partikel yang kecil memperbesar luas permukaan spesifik per satuan massa bahan. Keduanya menambah jumlah tapak jerapan yang tersedia bagi ion logam berat maupun H^+ di dalam larutan tanah, sehingga hasil XRD ini memberikan dasar structural bagi kemampuan *nanobiochar* dalam mengikat merkuri dan menaikkan pH tanah.

2.3.2 Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)

AMF adalah jamur tanah dari filum *Glomeromycota* yang bersimbiosis dengan lebih dari 80% spesies tanaman. Dalam simbiosis ini, jamir mendapat karbohidrat dari tanaman, sedangkan tanaman mendapat kemudahan menyerap air dan hara dari jaringan hifa yang luas. Pada lahan tambang yang terdegradasi, populasi AMF alami biasanya sangat sedikit, sehingga inokulasi AMF menjadi langkah pentning dalam revegetasi (Abdelaaziz et al., 2025).

Dalam remediasi logam berat, AMF bekerja dengan dua cara. Secara langsung, logam berat terperangkap di dalam struktur jamur seperti dinding hifa dan vesikel sehingga tidak terserap tanaman, secara tidak langsung, AMF meningkatkan pertumbuhan tanaman dan produksi antioksidan sehingga tanaman lebih tahan terhadap toksisitas logam. AMF juga menghasilkan glomalin yang memperbaiki struktur dan kemampuan tanah menahan air (Miransari, 2011).

2.3.3 Kompos

Kompos adalah hasil penguraian bahan organik seperti sisa tanaman dan pupuk kandang oleh mikoorganisme. Sebagai pembenah tanah, kompos memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah secara bersamaan dengan biaya rendah. Di lahan bekas tambang, kompos membantu meningkatkan pH

tanah, memeperbaiki struktur tanah yang padat, dan meningkatkan aktivitas mikoorganisme yang mendukung pemulihan tanah (Usman et al., 2023).

Dalam konteks remediasi logam berat, bahan organik dalam kompos mengikat ion logam melalui gugus fungsional aktif sehingga logam kurang tersedia bagi tanaman. Selain itu, kompos mendukung kelangsungan hidup AMF dan meningkatkan efektivitas nano biochar dengan memperbaiki kondisi tanah secara keseluruhan. Kombinasi ketiganya terbukti lebih efektif dalam menekan kadar logam berat dan meningkatkan pertumbuhan tanaman dibanding perlakuan tunggal (Ramanayaka et al., 2025).

2.4 *Melaleuca cajuputi*

Melaleuca cajuputi atau kayu putih adalah pohon dari *famili Myrtaceae* yang tumbuh alami di Asia Tenggara dan Australia. Tanaman ini dikenal sangat adaptif, mampu tumbuh di berbagai kondisi tanah yang buruk seperti lahan gambut, tanah berpasir, hingga lahan bekas tambang. Kemampuan ini didukung oleh sistem perakaran yang dalam dan mekanisme fisiologis yang kuat dalam menghadapi tekanan lingkungan (Mohd et al., 2013)

Keunggulan utama *Melaleuca cajuputi* dalam penelitian ini adalah kemampuannya mentoleransi dan mengakumulasi logam berat. Usman et al. (2023) menemukan bahwa tanaman ini memiliki nilai *Tranfer factor* (TF) lebih dari 1 untuk Zn dan Cd, artinya logam dipindahkan secara efesien dari akar ke tajuk. Nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) yang kurang dari 1 menunjukkan logam tidak menumpuk berlebihan di akar. Pola ini ideal untuk fitoekstraksi, dimana pemanenan tajuk secara berkala dapat mengangkat logam dari tanah secara bertahap.

Selain manfaat ekologis, *Melaleuca cajuputi* juga bernilai ekonomi karena daunnya memnghasilkan minyak atsiri yang digunakan dalam industri farmasi dan kosmetik. Pertumbuhannya juga memperbaiki kondisi lahan secara alami melalui tutupan tajuk yang mengurangi erosi, meningkatkakn infiltrasi air, dan menambah bahan organik dari serasah daun, sehingga mendukung pemulihan keanekaragaman hayati di kawasan bekas tambang dalam jangka panjang (Mohd et al., 2013).



Gambar 2. 1 Tanaman Melaleuca cajuputi

Sumber : madplant universitas nasional

2.5 Penelitian Terdahulu

Tinjauan penelitian terdahulu dilakukan untuk melihat posisi penelitian ini dalam perkembangan ilmu yang ada dan mengidentifikasi celah yang perlu diisi. Kajian literatur menunjukkan bahwa komponen-komponen penelitian ini, yaitu *nano biochar*, AMF, kompos, dan *Melaleuca cajuputi*, telah diteliti secara terpisah dan memberkan hasil yang menjanjikan. Namun, belum ada penelitian yang mengintegrasikan kesemuanya dalam satu sistem terpadu di lahan bekas tambang emas Indonesia.

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

No	**Peneliti (Tahun)**	**Judul**	**Metode**	**Hasil Penelitian**
1	Prasetyo et al. (2010)	Rehabilitasi lahan bekas tambang emas dengan inokulasi mikoriza arbuskula pada	Inokulasi AMF pada media tailing ; pot eksperimen skala rumah kaca	Inokulasi AMF meningkatkan tinggi tanaman hingga 42%, biomassa meningkat 38%, dan serapan fosfor

		semai Acacia mangium di media tailing		meningkat 56% pada media tailing secara signifikan, kolonisasi akar mencapai 65 – 80%, toleransi terhadap logam berat terbukti
2	Ramanayaka et al. (2020)	Green synthesis of graphitic nanobiochar for removal of organic and inorganic contaminants from equeous media	Sintesis hijau nano biochar, uji adsorpsi kontaminan organik dan logam berat dalam media cair dan tanah	Nano biochar grafitik menunjukkan kapasitas adsorpsi Pb hingga 98,7% mg/g dan Cd hingga 82,3% mg/g, efisiensi penghilangan logam berat mencapai >95% melalui mekanisme elektrostatik, pertukaran ion, dan kompleksasi permukaan, bioavailabilitas logam menurun signifikan
3	Mohd et al. (2013)	Green Synthesis of Graphitic Nanobiochar for the Removal of	Sintesis hijau nano biochar grafitik, uji adsorpsi	Melaleuca cajuputi mengakumulasi Zn dengan Bioconcentration

		Emerging Contaminants in Aqueous Media	kontaminan organik dan logam berat dalam media cair	Factor (BCF) = 1,8 dan Tranclocation factor (TF) = 1,2 untuk Cd, kadar Pb pada tajuk berkurang 45% dibanding kontrol, tanaman toleran pada konsentrasi logam berat hingga 200 mg/kg tanah
4	Putra et al. (2022)	Peran AMF dalam fitoremediasi logam berat dan pertumbuhan Pennisetum purpureum pada tailing tambang emas di Jambi	Inokulasi AMF 10g/pot, pengukuran parameter pertumbuhan dan analisis kadar logam berat Al, Co, Cr, Fe pada tailing	Inokulasi AMF 10g/pot menngkatkan tinggi tanaman 34% dan biomassa kering 29%, kadar Al menurun 52%, Cd menurun 47%, Cr menurun 38%, dan Fe menurun 41% pada media tailing, kolonisasi akar mencapai 72%
5	Usman et al. (2023)	Chromium Toxicity, Speciation, and Remediation Stretegies in Soil-Plant	Tinjauan sistematis strategi remediasi Cr di tanah, analisis spesiasi dan	Cr(VI) bersifat sangat toksik dan mobile di tanah, pendekatan kombinasi biologis dan kimia paling

		Interface: A Critical Review	mekanisme toksisitas pada antarmuka pada antarmuka tanah tanaman	efektif mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) hingga 85-92%, bioavailabilitas Cr turun 60-75% dengan penambahan bahan organik, konsentrasi Cr aman bagi tanaman <0,5 mg/kg
6	Abdelaaziz et al. (2025)	Arbuscular Mycorrhiazal Fungi and Their Role in Plant Disease Control : A State of the Art	Tinjauan komprehensif peran AMF terhadap ketahanan tanaman, analisis mekanisme biokimia dan ekologis simbiosis AMF	AMF meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen sebesar 40-65%, serapan P meningkat 25-40%, glomalin yang dihasilkan AMF memperbaiki agrgat tanah sebesar 35%, toleransi terhadap logam berat meningkat 45-70%
7	Zheng et al. (2025)	Role of biochar based nanocomposites in soil	Sintesis nanokomposit biochar berbagai formula, uji	Nanokomposit biochar mengimobilisasi Pb sebesar 91%,

		remediation, heavy metal immobilization and ecological safety	imobilisasi logam berat Pb, Cd, Hg, analisis keamanan ekologis nanopartikel	Cd sebesar 87%, dan Hg sebesar 89%, kapasitas adsorpsi meningkat 2,5-4,0 kali dibanding biochar biasa, potensi pelepasan nanopartikel ke tanah <5% setelah 90 hari inkubasi
8	Khan et al. (2025)	Using Biochar, compost, and dry organic amendments combined with mycorrhizae for heavy metal pollution mitigation in soil	Perlakuan kombinasi biochar + AMF (T8), analisis kadar Pb, Cd, Ni pada gabah dan parameter pertumbuhan tanaman	Kombinasi biochar+AMF paling efektif menurunkan kadar Pb, Cd, dan Ni pada gabah hingga 93%, 76%, 83%, bobot kering pucuk dan akar meningkat 66% dan 48% masing-masing

Berdasarkan tabel di atas, beberapa ppola temuan penting dapat dirangkum. Pertama, AMF secara konsisten meningkatkan toleransi tanaman terhadap logam berat dan memperbaiki serapan hara pada berbagai jenis tanaman terhadap logam berat dan memperbaiki serapan hara pada berbagai jenis tanaman (Prasetyo et al., 2010). Kedua, nano biochar dan nanokomposit berbasis biochar terbukti lebih efektif mengimobilisasi logam berat dibanding biochar biasa (Ramayanaka et al., 2020). Ketiga, kombinasi biochar dan AMF menghasilkan efek sinergis yang lebih

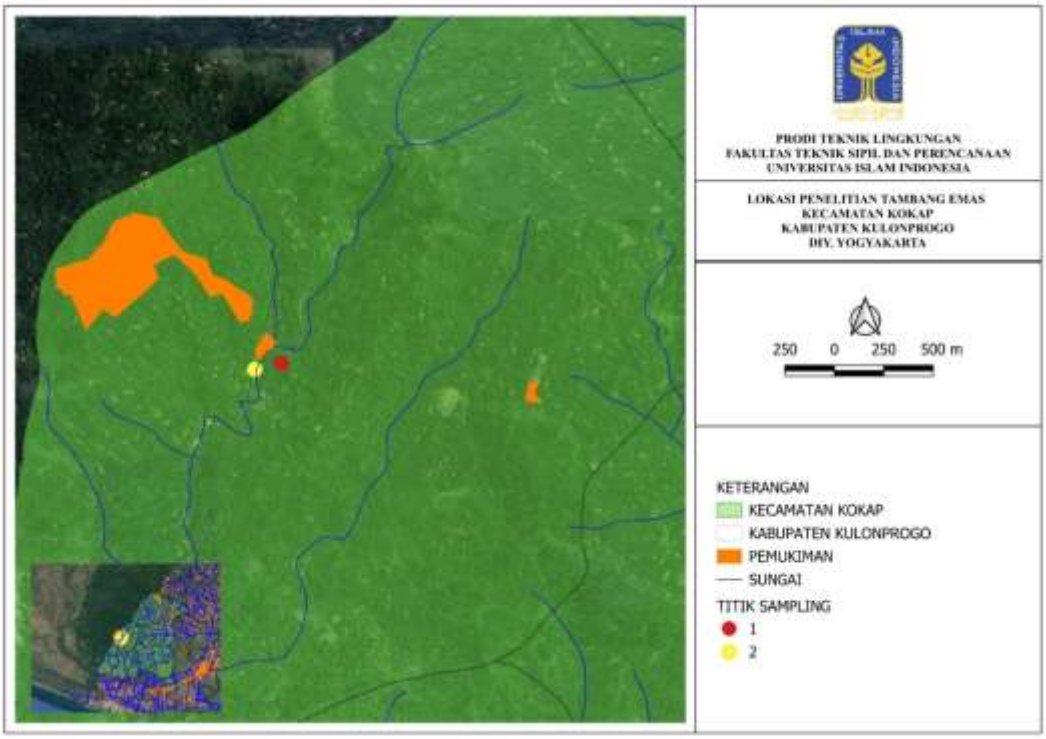
baik dari perlakuan tunggal, dengan penurunan kadar logam berat yang signifikan pada jaringan tanaman (Khan et al., 2025).

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilakukan pada skala rumah kaca mulai dari persiapan media tanam, penanaman, pengamatan, dan pemanenan tanaman *Melaleuca cajuputi*. Rumah kaca berlokasi di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.

Titik sampling terdiri dari dua titik, pengambilan 2 titik lokasi sampel berada di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Titik sampling pada penelitian ini terletak pada koordinat 7°49'37.9"S 110°04'15.6"E untuk lokasi satu dan 7°49'38.9"S 110°04'11.2"E untuk lokasi dua. Selain tanah tambang emas, penelitian ini menggunakan sampel tanah non tambang yang diambil di sekitar lokasi yang tidak terdampak secara langsung. Perbedaan lokasi pengambilan sampel ada pada kondisi sekitarnya. Di titik pertama, lokasinya dekat dengan peternakan kambing dan kebun warga, sedangkan di titik kedua lebih banyak ditumbuhi semak-semak dan letaknya sekitar 15 meter dari tepi sungai. Berikut adalah peta lokasi titik sampling yang dilakukan:



Gambar 3. 1 Peta Lokasi Titik Sampling

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

Tabel 3. 1 Alat

No	Alat	Kegunaan
1	Polybag 15x15 cm	Sebagai wadah bagi media tanam dan tanaman
2	Caliper Digital	Alat ukur diameter batang
3	Meteran	Alat ukur tinggi tanaman
4	Autoclave	Alat sterilisasi yang menggunakan uap air bertekanan tinggi dan panas untuk membunuh mikroorganisme
5	Timbangan Analitik	Untuk menimbanh berat basah dan berat kering tanaman uji
6	Timbangan Digital	Untuk menimbang bahan kimia yang digunakan
7	Oven	Untuk mengeringkan atau menghilangkan kadar air jaringan tanaman
8	Amplop Coklat	Sebagai wadah jaringan akar dan jaringan batang
9	Plastik Klip	Sebagai wadah sampel setelah dihaluskan dan ditimbang

10	Tabung Reaksi	Sebagai wadah untuk mencampuran dan menampung larutan sebelum diujikan
11	Rak Tabung Reaksi	Sebagai wadah untuk meletakan tabung reaksi
12	Erlenmeyer 250 ml	Sebagai wadah untuk mencampur dan menampung larutan
13	Gelas Beaker 250 ml	Sebagai wadah destruksi sampel
14	Corong Kaca	Untuk meletakan kertas saring saat menyaring sampel hasil destruksi
15	Kaca Arloji	Sebagai wadah untuk menimbang sampel dan bahan
16	Spektrofotometer UV	Analisis kadar logam berat
17	Inductively Coupled Plasma (ICP)	Analisis kadar merkuri (Hg) dan Aluminium (Al)
18	Kamera	Dokumentasi hasil pertumbuhan tanaman

3.2.2 Bahan

Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu:

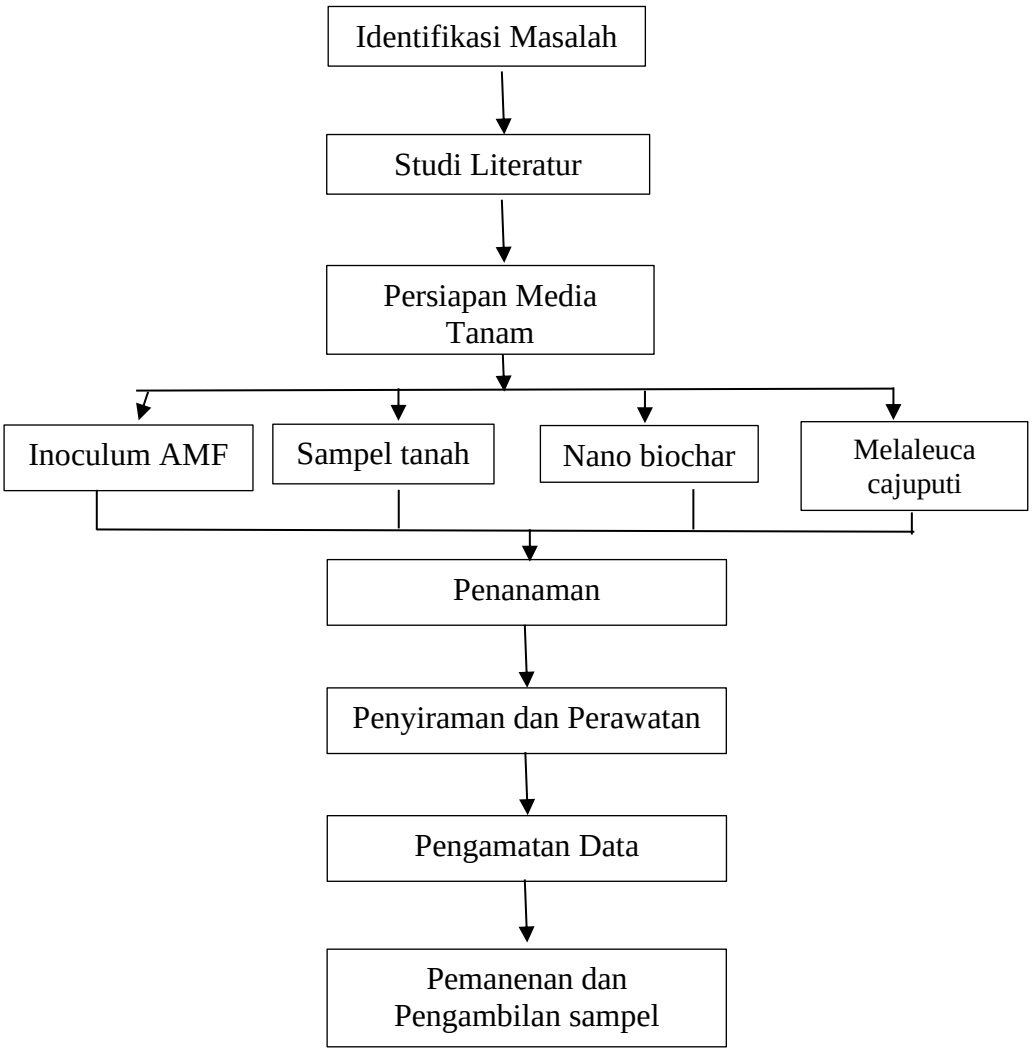
Tabel 3. 2 Bahan

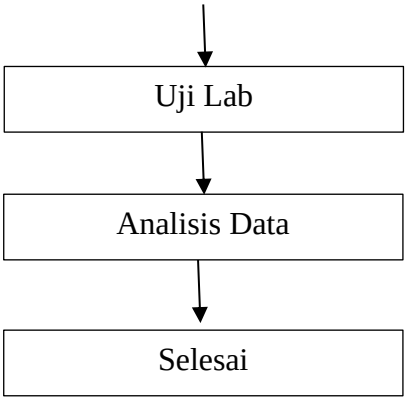
No	Bahan	Kegunaan
1	Bibit Melaleuca cajuputi	Sebagai vegetasi penguji dalam penelitian
2	Tanah Bekas Tambang Emas	Sebagai media tanam dan media yang diujikan
3	Nanobiochar	Bahan pembenah tanah untuk imobilisasi logam berat
4	Inoculum AMF	Bahan pembenah tanah hayatti untuk meningkatkan serapan hara
5	Kompos	Bahan pembenah tanah organic
6	Arang sekam	Bahan campuran media tanam pada seluruh perlakuan
7	Akuades=	Pelarut dan pengencer larutan
8	HNO3 pekat dan HCl pekat	Destruksi sampel tanah dan jaringan tanaman

9	Larutan pengekstrak Bray I	Ekstraksi fosfor tersedia pada tanah
10	Larutan HCl 25%	Ekstraksi fosfor potensial pada tanah dan P total jaringan tanaman

3.3 Tahapan Penelitian

Pengumpulan data dilakukan melalui dua jenis sumber, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengamatan langsung di lapangan serta analisis di laboratorium. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari studi literatur, seperti situs resmi, jurnal ilmiah, dan berbagai referensi lain yang relevan sebagai acuan selama proses penelitian. Adapun tahapan penelitian dapat dilihat sebagai berikut.





Gambar 3. 2 Prosedur Uji Analisis

3.4 Persiapan Media Tanam

Bahan pembenah tanah yang digunakan pada penelitian ini adalah kompos dan AMF. Kompos dengan berat 25g dicampurkan dengan tanah bekas tambang dengan berat 475 g. kompos yang digunakan berasal dari toko pertanian dengan kandungan N total sebesar 1,51%, P_2O_5 total sebesar 1,6%, dan K_2O total sebesar 5,93%. Selanjutnya akar tanaman ditaburkan AMF sekitar 25g di sekeliling akar tanaman.

Tahap awal dalam persiapan media tanam dilakukan dengan mensterilkan tanah bekas tambang emas yang telah dikumpulkan. Proses sterilisasi ini bertujuan untuk menghilangkan mikroorganisme patogen yang mungkin masih ada di dalam tanah. Sterilisasi dilakukan dengan mengukus tanah dengan alat berbasis uap bertekanan tinggi, dilakukan selama sekitar lima jam pada suhu tinggi untuk memastikan tanah benar-benar bebas dari kontaminasi. Komposisi media di dalam polybag yang berukuran 15 x 15 cm yaitu 90% atau 475 g tanah, 5% atau 25 g kompos, dan 5% atau 25 g AMF.



Gambar 3. 3 Proses Pencampuran Tanah Bekas Tambang dan Pembenah Tanah

3.5 Penanaman dan Inokulasi AMF

Penanaman dilakukan pada pagi hari untuk memanfaatkan suhu udara yang masih sejuk dan kelembaban tanah yang optimal. Tanaman yang digunakan adalah tanaman kayu putih (*Melaluca cajuputi*), yang dikenal memiliki kemampuan adaptasi tinggi dan nilai ekonomis yang cukup tinggi. Tanaman *Melaleuca cajuputi* ditanam menggunakan polybag yang berukuran 15 x 15 dengan jumlah ulangan tanaman setiap kode perlakuan sebanyak 4 pengulangan. Di bawah ini merupakan daftar kode perlakuan yang digunakan saat menganalisis data penelitian :

Tabel 3. 3 Daftar Kode Perlakuan

No	Perlakuan	Keterangan
1	P1	Soil 475 gr + Arang Sekam Padi 5% (25 gr) + Compost 5% (25 gr)
2	P2	Soil 475 gr + *Nano biochar* ½ % (12,5 gr) + Compost 5% (25 gr)
3	P3	Soil 475 gr + *Nano biochar* ½ % (12,5 gr) + Compost 5% (25 gr) + AMF 5% (25 gr)



Gambar 3. 4 Proses Penanaman

Inokulasi AMF dilakukan bersamaan dengan proses penanaman. Media tanam disiapkan terlebih dahulu, kemudian inoculum AMF sebanyak 25 gram ditaburkan di sekeliling perakaran bibit. Penempeatan inoculum di sekitar perakaran bertujuan mempercepat proses kolonisasi akar oleh AMF. Setelah itu, media ditambahkan hingga setara dengan tinggi polybag.



Gambar 3. 5 Proses Innokulasi AMF

3.6 Perawatan dan Pengamatan

Penyiraman dilakukan setiap hari pada sore hari sekitar pukul 16.00. Pengamatan pertumbuhan tanaman dilakukan dengan pengukur tinggi, diameter, dan jumlah daun setiap 2 kali seminggu. Tinggi tanaman diukur dari bagian leher akar hingga batang bagian atas. Sementara untuk diameter batang diukur pada jarak 1 cm dari permukaan tanah. Hal ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perlakuan pembenah tanah terhadap pertumbuhan tanaman.





Gambar 3. 6 Perawatan da Pengamatn Tanaman

3.7 Pemanenan

Pemanenan dilakukan setelah 4 bulan masa tanam. Proses pemanenan diawali dengan memisahkan tanaman dari media, kemudia memisahkan jaringan batang (shoot) dan jaringan akar (root). Akar dibersihkan dari partikel tanah yang menempel menggunakan air mengalir lalu ditiriskan.

Berat basah jaringan batang dan akar ditimbang menggunakan timbangan analitik, kemudia setiap sampel dimasukkan ke dalam amplop cokelat yang telah diberi kode tanaman. Berat kering diperoleh dengan mengeringkan jaringan tanaman di dalam oven pada suhu 50°C selama 72 jam, kemudian ditimbang Kembali. Selisih berat basah an berat kering digunakan untuk menghitung kadar air jaringan sebagai factor koreksi pada perhitungan kadar hara dan logam berat.

Sampel tanah dari setiap polybag diambil dan disimpan di dalam plastic transparan yang ditutup rapat agar tidak terjadi pertukaran udara, kemudian dibungkus Kembali menggunakan plastic hitam sehingga berada dalam kondisi gelap. Penyimpanan dalam kondisi gelap bertujuan mempertahankan sifat asli tanah uji sampai analisis laboratorium dilakukan. Setiap sampel diberi kode sesuai perlakuan dan ulangan untuk memudahkan pendataan.



Gambar 3. 7 Pemanenan Tanaman

3.8 Analisis Data

Data yang dianalisis pada penelitian ini terdiri atas dua kelompok, yaitu data pertumbuhan tanaman dan data hasil uji laboratorium. Data pertumbuhan meliputi tinggi tanaman, diameter batas, serta biomassa basah dan biomassa kering pada jaringan batang (shoot) dan akar (root). Data hasil uji laboratorium meliputi kandungan fosfor sebagai P_2O_5 pada media tanam dan pada jaringan tanaman, serta kandungan merkuri (Hg) pada media tanam, jaringan batang, dan jaringan akar.

Kandungan fosfor pada media tanam menggunakan metode ekstraksi Bray I, sedangkan kandungan fosfor pada jaringan tanaman menggunakan ekstraksi HCl 25%. Pembacaan kedua parameter tersebut dilakukan menggunakan spektrofotmeter UV-Vis setelah pembuatan deret standaar dan kurva kalibrasi. Kandungan Hg melalui destruksi asam yang dilanjutkan dengan pembacaan menggunakan Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). Analisis pada jaringan tanaman dilakukan secara terpisah antara batang dan akar agar ppola distribusi merkuri di dalam tanaman dapat diketahui.



Gambar 3. 8 Pengujian Sampel

3.9 Proses Analisa Data

Proses analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil pengamatan pada tanah sampel yang diberi perlakuan stabilisasi dengan tanah kontrol yang tidak mendapatkan perlakuan, kemudian disajikan dalam bentuk diagram dan grafik. Tujuan akhir dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi kompos dan AMF sebagai bahan pembenah tanah terhadap status kualitas tanah dan tanaman *melaleuca cajuputi.* pada lahan bekas tambang emas.

3.9.1 Perhitungan logam berat merkuri (Hg)

Pengolahan data untuk dapat mengetahui kadar kandungan logam berat merkuri (Hg) pada tanah dan tanaman mengacu pada SNI 8910 : 2021 tentang Cara uji logam dalam contoh uji limbah padat, sedimen, dan tanah dengan metode destruksi asam menggunakan Spektrometer Serapan Atom (SSA)-Nyala atau *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometric* (ICP-OES).

$$\text{kadar logam (mg/kg)} = \frac{C \times V}{W \times P} \times \text{fp}$$

keterangan :

C = konsentrasi contoh uji yang di dapat dari SSA-Nyala atau *ICP-OES* (mg/L)

V = volume akhir setelah proses destruksi (Ml)

W = berat contoh uji (gr)

Fp = faktor pengenceran

P = fraksi padat

3.9.2 Perhitungan kandungan P_2O_5

Pengolahan data untuk dapat mengetahui kadar kandungan P_2O_5 pada jaringan tanaman mengacu pada panduan petujuk teknis edisi 3 tentang Analisis Kimia Tanah, Tanaman Air dan Pupuk. Dengan penetapan P Ekstrak HCL 25% untuk mengetahui kandangan K potensial (mg P_2O_5 100 g-1). Perhitungan pengolahan data menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{kadar logam (mg/kg)} = \frac{C \times V}{W \times P} \times \text{fp}$$

keterangan :

C = konsentrasi contoh uji yang di dapat dari SSA-Nyala atau *ICP-OES* (mg/L)

V = volume akhir setelah proses destruksi (Ml)

W = berat contoh uji (gr)

Fp = faktor pengenceran

P = fraksi padat

Pengolahan data untuk dapat mengetahui kadar kandungan P_2O_5 pada tanah mengacu pada panduan petujuk teknis edisi 3 tentang Analisis Kimia Tanah, Tanaman Air dan Pupuk. Dengan penetapan fosfor tersedia dengan metode Bray 1 untuk mengetahui kandungan P_2O_5 teredia (ppm) Perhitungan pengolahan data menggunakan rumus sebagai berikut :

P_2O_5 teredia (ppm) = ppm kurva × ml ekstrak/1.000 × 1.000 g(g contoh)-1 x fp × 142/190 ×fk

keterangan :

Ppm kurva	= kadar contoh yang didapat dari kurva hubungan antara kadar deret standar dengan pembacaannya setelah dikoreksi blanko
142/190	= faktor konversi bentuk PO_4 menjadi P_2O_5
fk	= faktor koreksi kadar air = 100/(100-% kadar air)
fp	= faktor pengenceran

BAB IV

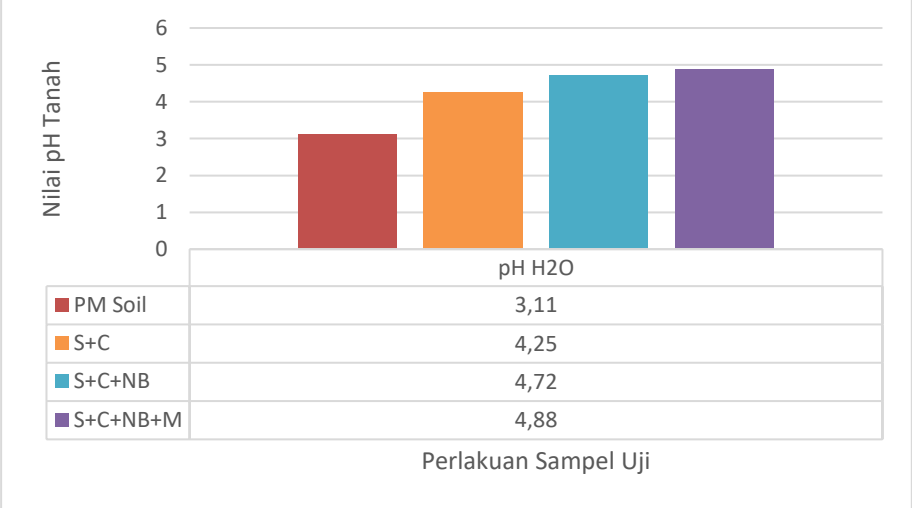
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap pH Media Tanam

Hampir seluruh persoalan pada tanah bekas tambang emas bermuara pada kondisi yang terlalu masam sebagaimana telah diuraikan pada Bab II. Pengukuran dilakukan satu kali pada akhir masa tanam terhadap media di dalam polybag menggunakan pelarut akuades (pH H_2O) dengan metode elektrometri sesuai Petunjuk Teknis Balai Penelitian Tanah (2012). Nilai pH H_2O dipilih karena menggambarkan keasaman aktif, yaitu ion H^+ yang benar-benar berada di dalam larutan tanah dan langsung bersentuhan dengan permukaan akar, sehingga paling relevan untuk dikaitkan dengan respons pertumbuhan tanaman uji. Hasil pengukurannya disajikan pada table berikut :

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran pH Media Tanam

Perlakuan	pH H_2O
S+C	4,25
S+C+NB	4,72
S+C+NB+M	4,88



Gambar 4. 1 Nilai pH Tanah

Berdasarkan table diatas, nilai pH H_2O naik mengikuti kelengkapan bahan pembenah, yaitu 4,25 pada S+C, 4,72 pada S+C+NB, dan 4,88 pada S+C+NB+M. selisihnya terhadap S+C berturut-turut sebesar 0,47 dan 0,63. Angka tersebut sekilas terlihat kecil, tetapi skala pH bersifat logaritmik sehingga kenaikan 0,63 sebanding dengan berkurangnya konsentrasi H^+ di larutan tanah hingga sekitar empat kali lipat. Karena ketiga perlakuan menerima kompos dalam takaran yang sama, perbedaan tersebut tidak mungkin bersumber dari kompos, melainnkan dari tambahan *nanobiochar* dan AMF. Hal ini semakin jelas apabila dibandingkan dengan polybag control yang hanya berisi tanah bekas tambang dan sekan padi, yang justru tercatat memiliki pH 4,59 atau lebih tinggi daripada S+C. Artinya, pemberian kompos saja belum cukup untuk menaikkan pH media, bahkan berpotensi menurunkannya sementara akibat asam-asam organic yang dilepaskan selama proses dekomposisi. Nilai pH baru melampaui control setelah *nanobiochar* ikut ditambahkan.

Kemampuan nanobiochar menaikkan pH berkaitan erat dengan sifat bahannya. Proses pirolisis meninggalkan fraksi abu yang kaya kation basa seperti K, Ca, dan Mg dalam bentuk oksida maupun karbonat, dan senyawa tersebut bereaksi dengan H^+ di larutan tanah sehingga perannya mneyerupai kapur dalam skala kecil. Selain itu, permukaan biochar mengandung gugus fungsi bermuatan seperti karboksil dan fenolik yang mampu menjerap H^+ maupun Al^{3+}. Pengecilan ukuran partikel sampai skala nano membuat luas permukaan spesifik per gram bahan menjadi jauh lebih besar, sehingga jumlah titik reaksi yang tersedia ikut bertambah meskipun dosis yang diberikan tetap sama (Zheng et al., 2025). Kecenderungan serupa juga terangkum dari banyak percobaan pemanfaatan biochar pada tanah tercemar logam berat, yaitu pH tanah meningkat seiring penambahan bahan tersebut (Zhang et al., 2022)

Nilai pH tertinggi diperoleh pada perlakuan S+C+NB+M, yang berarti kehadiran AMF masih memberi tambahan perbaikan di atas *nanobiochar*. AMF tidak menaikkan pH secara langsung seperti bahan berkapur, melainkan bekerja melalui jaringan hifa yang memperluas jangkauan perakaran dan mnegubah kondisi rizosfer, serta melalui perbaikan kondisi tanaman inang

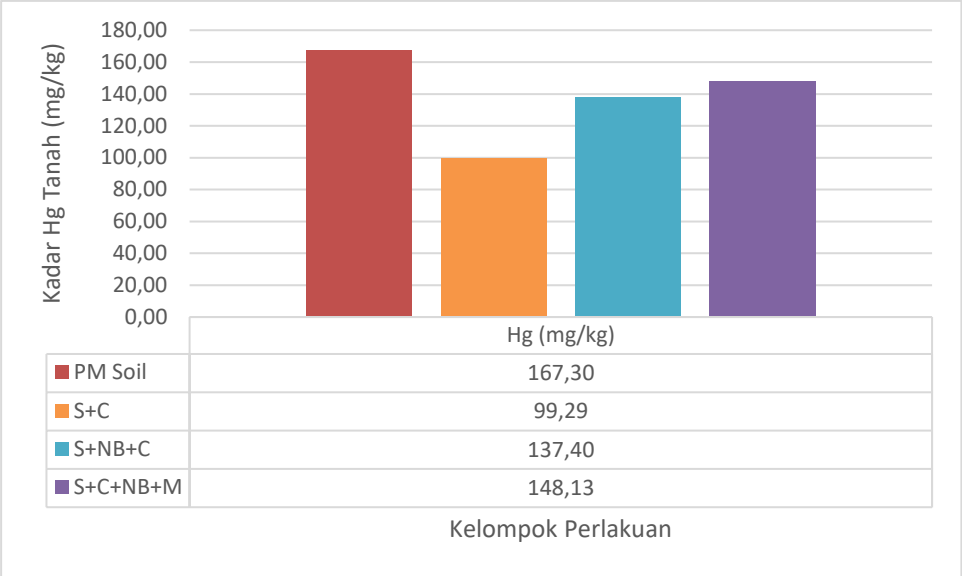
sehingga pola pelepasan eksudut akar ikut berubah. Kombinasi biochar, kompos, dan mikoriza memang dilaporkan memberikan perbaikan sifat kimia tanah yang lebih baik dibandingkan pemberian bahan secara tunggal (Khan et al., 2025). Dukungan lain terlihat dari nilai kapasitas tukar kation pada pengujian yang sama, yaitu naik dari 12,02 cmol(+)/kg pada S+C menjadi 12,74 cmol(+)/kg pada S+C+NB dan 12,95 cmol(+)/kg pada S+C+NB+M. Bertambahnya kapasitas tukar kation menunjukkan media memiliki lebih banyak tapak jerapan, sehingga hara yang diberikan tidak mudah tercuci dan kondisi media menjadi lebih stabil.

Ketiga nilai pH H_2O masih berada pada kisaran masam, yaitu di bawah 5,5, sehingga media belum mencapai rentang yang ideal bagi sebagian besar tanaman budidaya. Kayu putih (Melaleuca cajupputi) tergolong toleran terhadap kondisi masam sehingga masih mampu tumbuh pada kisaran tersebut, namun untuk jenis tanaman lain kondisi ini kemungkinan masih menjadi factor pembatas. Pengujian pH juga dilakukan sekali di akhir percobaan dan tanpa ulangan laboratorium, sehingga angkanya lebih tepat dibaca sebagai kecenderungan antarperlakuan dan bukan sebagai nilai mutlak yang dapat diuji secara statistic.

4.2 Pengaruh Bahan Pembenah Tnah Terhadap Reduksi Logam Merkuri (Hg)

4.2.1 Konsentrasi Hg pada Media Tanam

Merkuri merupakan pencemar utama pada lahan bekas tambang emas rakyat, sehingga perilakunya di dalam media menjadi penilaian pertama atas kinerja bahan pembenah. Berikut merupakan hasil pengujian kadar Hg pada media di akhir percobaan disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4. 2 Konsentrasi Hg tanah

Gambar di atas merupakan hasil pengujian kadar Hg. Kadar Hg pada media meningkat seiring bertambanhnya kelengkapan bahan pembenah, yaitu 99,29 mg/kg pada S+C, 137,40 mg/kg pada S+NB+C, dan 148,13 mg/kg pada S+C+NB+M. Sekilas hasil ini terlihat berlawanan dengan tujuan penelitian, padahal tidak ada satu pun perlakuan yang menambahkan Hg ke dalam system sehingga jumlah merkuri pada setiap polybag pada dasarnya berasal dari sumber yang sama. Kenaikan kadar Hg pada fase padat justru menandakan Hg tertahan di dalam media dan tidak berpindah ke jaringan tanaman. Hal ini didukung oleh data jaringan, karena pada perlakuan yang kadar Hg medianya paling tinggi, kadar Hg pada akarnya justru paling rendah. Mekanisme seperti ini dikenal sebagai imobilisasi atau fitostabilisasi, dan justru merupakan pendekatan yang sesuai untuk Hg karena logam ini berbahaya apabila berpindah ke rantai makanan atau tercuci ke badan air, bukan Ketika tetap terikat pada fase padat.

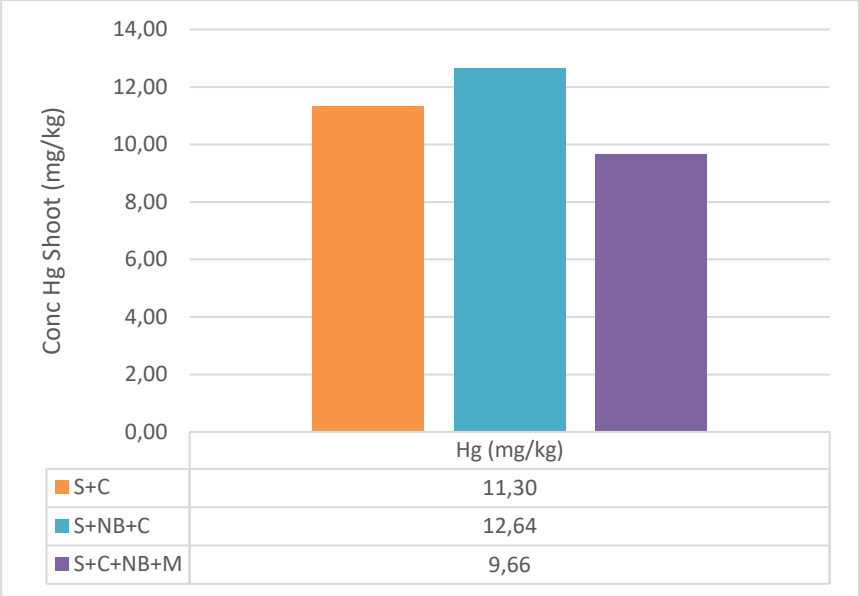
Pola tersebut sejalan dengan kenaikan pH yang telah dibahas pada subbab 4.1. jika data pH dan data Hg pada penelitian ini disandingkan, keduanya bergerak searah dengan pola yang cukup rapi. Setiap kali pH media naik, kadar Hg yang tertahan di media ikut naik, sementara kadar Hg yang berpindah ke akar justru turun, sehingga ph pantas dipandang sebagai

salah satu factor utama di balik menguatnya penambatan merkuri pada perlakuan-perlakuan tersebut. Naiknya pH memperkecil jumlah ion H^+ bebas dalam larutan tanah, sehingga logamm berat seperti merkuri tidak lagi banyak bersaing dengan H^+ untuk menempel pada permukaan partikel tanah maupun nanobiochar, ditambah lagi permukaan bahan-bahan tersebut menjadi lebih bermuatan negative seiring naiknya pH akibat terlepasnya H^+ dari gugus-gugus fungsional di permukaannya, sehingga daya tariknya terhadap ion logam yang bermuatan positif kian besar. Pada saat bersamaan, kondisi yang tidak terlalu asam juga membuat merkuri lebih condong mengendap sebagai senyawa yang sukar larut ketimbang tetap melayang bebas dalam larutan (Alloway, 2013; Varnaser Ghandali et al., 2024). Kondisi ini turut ditopong oleh naiknya kapasitas tukar kation yan telah dibahas pada subbab 4.1, yang secara konsisten juga mengindikasikan bertambahnya muatan negative permukaan media seiring naiknya pH, dan sejalan pula dengan temuan umum bahwa pembenah tanah tercemar logam berat dengan biochar cenderun diikuti oleh penurunan kelarutan logam. Meski begitu, karena pH hanya diukur satu kali di akhir percobaan tanpa ulangan laboratorium.

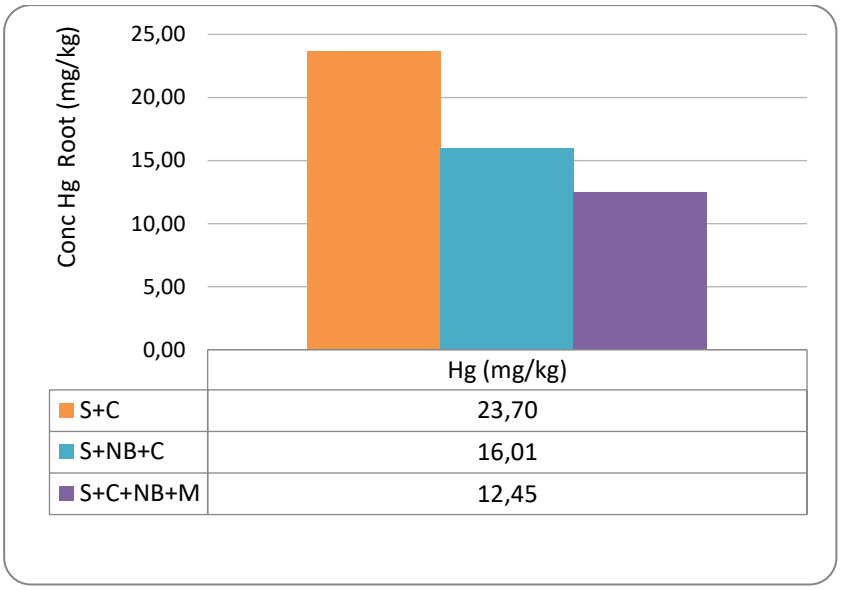
Pada kondisi yang tidak terlalu masam, logam berat cenderung berpindah dari fase larutan ke fase padat melalui pengendapan dan pengikatan pada permukaan koloid, sehingga bagian yang mudah bergerak dan mudah diserap akar berkurang. Selain melalui pengaruh pH, *nanobiochar* juga mengikat logam berat secara langsung melalui adsorpsi elektrostatik, pertukaran ion, kompleksasi permukaan, dan presipitasi, yang seluruhnya bergantung pada gugus fungsi dan struktur berpori bahannya (Zheng et al., 2025). Pada system yang menggabungkan biochar dan AMF, berkurangnya fraksi logam yang mudah berpindah disertai bertambahnya fraksi residu juga telah dilaporkan (riaz et al., 2021).

4.2.2 Konsentrasi Hg pada Jaringan Tanaman

Untuk memastikan bahwa merkuri benar-benar tertahan di media dan bukan sekedar berpindah tempat, kadar Hg juga diukur pada jaringan batang dan akar tanaman uji. Hasilnya disajikan pada gua gambar berikut.



Gambar 4. 3 Konsentrasi Hg Batang



Gambar 4. 4 Konsentrasi Hg Akar

Terlihat pada gambar di atas bahwa Hg pada akar menurun secara konsisten mengikuti kelengkapan bahan pembenah, yaitu dari 23,70 mg/kg pada S+C menjadi 16,01 mg/kg pada S+NB+C dan 12,45 mg/kg pada S+NB+C+M. Arahnya berlawanan dengan kadar Hg pada media yang justru

naik, sehingga penurunan ini memperkuat kesimpulan bahwa bahan pembenah bekerja dengan cara menekan ketersediaan Hg bagi tanaman, bukan dengan mengurangi jumlah Hg di dalam media.

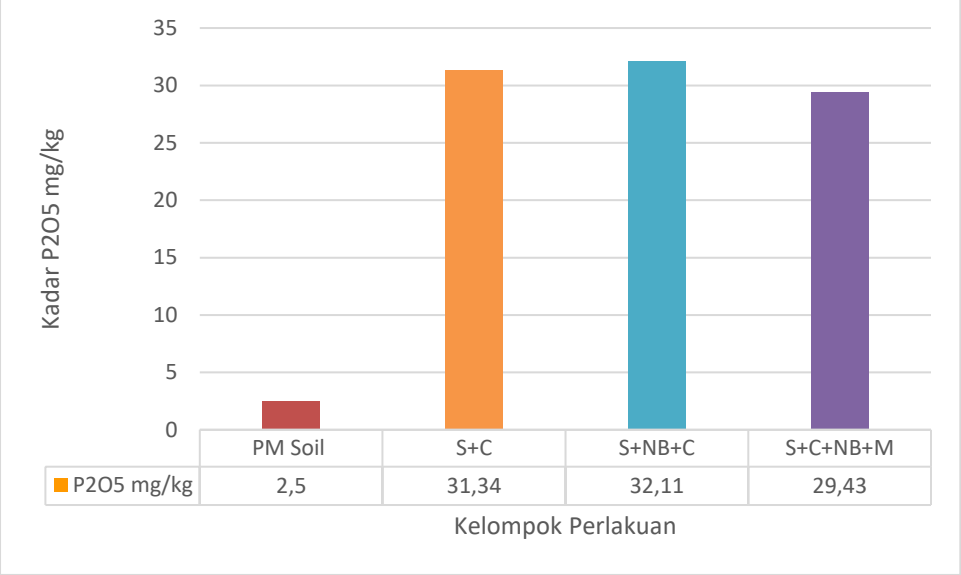
Pada jaringan batang polanya sedikit berbeda. Kadar Hg batang pada S+NB+C sebesar 12,64 mg/kg, masih sedikit di atas S+C yang sebesar 11,30 mg/kg, lalu turun tajam menjadi 9,66 mg/kg pada S+NB+C+M. Artinya *nanobiochar* efektif menahan Hg agar tidak banyak masuk ke akar, tetapi penurunan Hg pada batang baru benar-benar terjadi setelah AMF ditambahkan. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua bahan bekerja pada tahap yang berbeda, yaitu nanobiochar menahan merkuri di media sebelum sampai ke akar, sedangkan AMF menahan merkuri yang sudah terlanjur masuk agar tidak diteruskan ke bagian atas tanaman.

Kadar Hg pada akar selalu lebi tinggi daripada pada batang di semua perlakuan, dengan selisih sekitar dua kali lipat. Hal ini menunjukkan bahwa akar berfungsi sebagai penghalang utama yang menahan merkuri agar tidak naik ke bagian atas tanaman (Mei et al., 2021). Symbiosis AMF diektahui memperkuat penghalang tersebut melalui modifikasi dinding sel akar yang meningkatkan pengikatan logam berat pada jaringan akar. AMF mengikat logam berat pada wilayah korteks akar sehingga translokasi ke bagian atas tanaman tertahan, dan nilai TF pada tanaman bermikoriza umumnya lebih rendah daripada tanaman tanpa mikoriza (Dhalaria et al., 2020). Karakter ini penting bagi Melaleuca cajuputi, sebab bagian yang dimanfaatkan dari tanaman tersebut adalah daunnya sebagai bahan baku minyak atsiri, sehingga rendahnya kadar merkuri pada jaringan bagian atas menjadi pertimbangan keamanan tersendiri apabila tanaman ini ditanam di lahan bekas tambang.

4.3 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Ketersediaan dan Serapan Fosfor (P)

4.3.1 Konsentrasi P_2O_5 pada Media Tanam

Kandungan fosfor (P) pada media tanam di akhir percobaan disajikan pada grafik di bawah ini dimana fosfor diukur menggunakan metode Bray I.



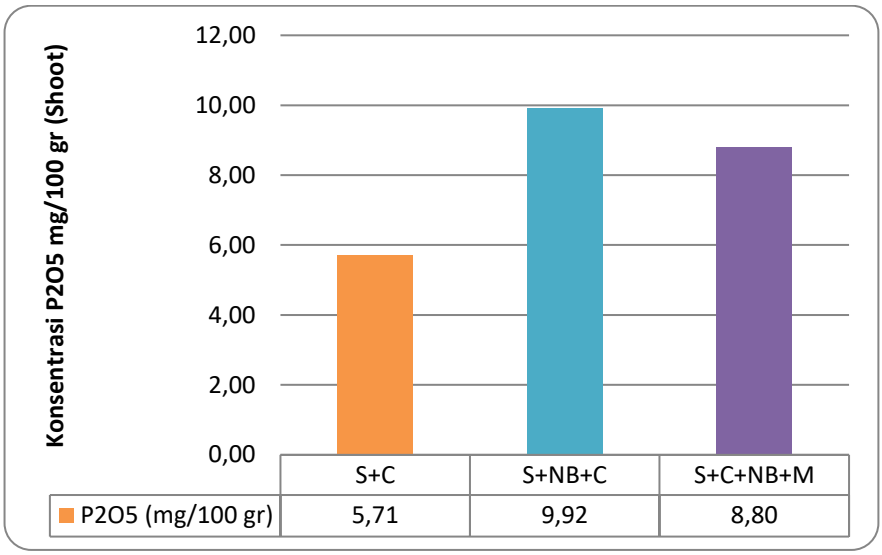
Gambar 4. 5 Grafik Hasil Pengujian Konsentrasi P2O5 Tanah

Kadar fosfor tertinggi justru terdapat pada perlakuan S+NB+C, yaitu 32,11 mg P_2O_5/kg, disusul S+C sebesar 31,34 mg P_2O_5/kg dan S+NB+C+M sebesar 29,43 mg P_2O_5/kg. Ketiga perlakuan menerima kompos dalam jumlah yang sama, perbedaan ini tidak berasal dari beda pasokan fosfor, melainnkan dari dua hal lain. Pertama, nanobiochar berperan sebagai penjerap yang membantu menahan fosfor agar tidak cepat terikat oleh logam maupun tercuci, sehingga fosfor pada S+NB+C masih relative utuh di akhir percobaan. Kedua, kadar yang tertukar di akhir percobaan merupakan sisa setelah tanaman menyerapnya selama masa tanam, sehingga nilai yang rendah belum tentu berarti fosfornya tidak tersedia, melainkan bisa jadi justru karena Sebagian besar sudah berpindah ke jaringan tanaman.

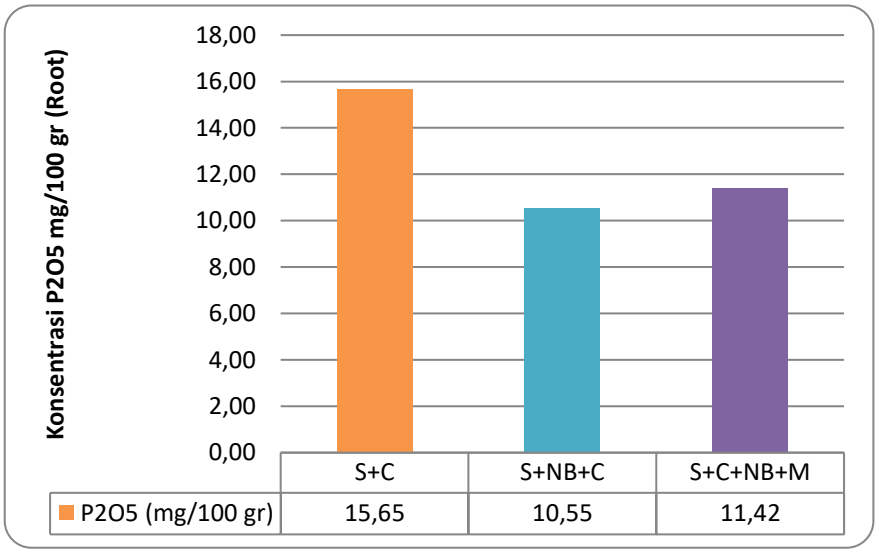
Naiknya pH media juga mendukung kondisi tersebut. Pada tanah masam, fosfor mudah terikat oleh alumnium dan besi membentuk senyawa yang dukar larut, sedangkan penambahan bahan organic dan kenaikan pH mampu menekan kelarutan aluminium sehingga fosfor Kembali tersedia bagi tanaman (Utami et al., 2019). Hal mengenai berpindahnya fosfor ke jaringan tanaman dapat diperiksa melalui hasil pengujian pada subbab berikutnya.

4.3.2 Konsentrasi pada Jaringan Tanaman

Berikut ini adalah grafik dari hasi pengujian konsentrasi P_2O_5 tanaman:



Gambar 4. 6 Grafik Hasil Pengujian P2O5 Batang



Gambar 4. 7 Grafik Hasil Pengujian P2O5 Akar

Berdasarkan gambar di atas, kadar fosfor pada batang tertinggi dicapai perlakuan S+NB+C sebesar 9,92 mg/100 g, disusul S+NB+C+M sebesar 8,80 mg/100 g, sedangkan S+C hanya 5,71 mg/100 g. Kdua perlakuan yang mengandung *nanobiochar* lebih tinggi daripada S+C. Hasil ini berkebalikan dengan kadar fosfor pada media, karena d media justru S+NB+C+M yang paling rendah. Artinya rendahnya fosfor media pada perlkuan tersebut memang

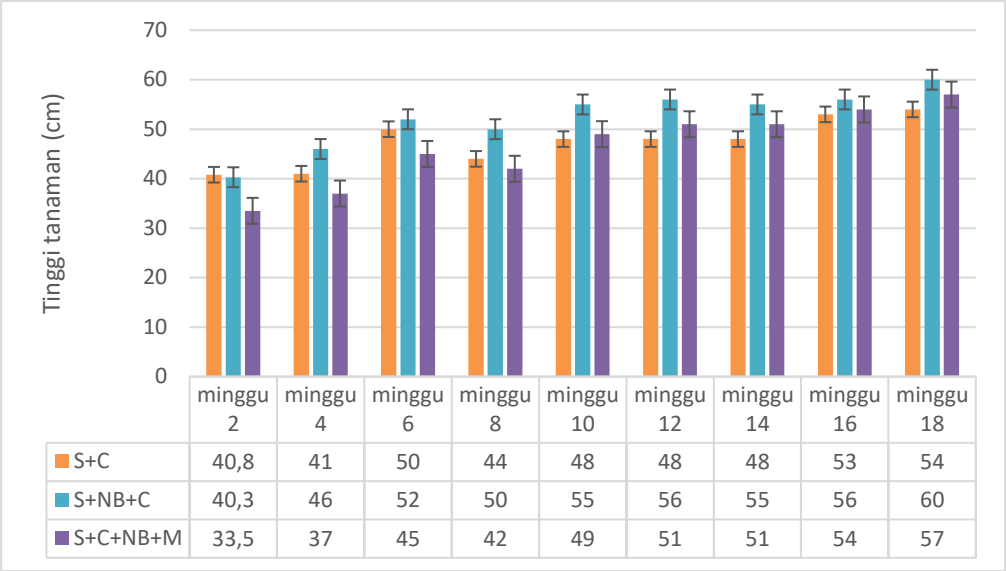
disebabkan fosfornya sudah berpindah ke jaringan tanaman, sehingga dugaan pada subbab sebelumnya dapat dikonfirmasi.

Pola tersebut memperjelas peran masing-masing bahan. Pada perlakuan S+C, fosfor banyak tertahan di akar (15,65 mg/100 g) dan hanya sedikit yang dipindahkan ke batang, sehingga rasio batang ke akar hanya 0,36. Sementara itu, pada perlakuan S+NB+C kadar fosfor akar sebesar 10,55 mg/100 g menghasilkan rasio 0,94 dan S+NB+C+M dengan kadar fosfor akar 11,42 mg/100 g mengahsilkan rasio 0,77, keduanya jauh diatas S+C. Dengan kata lain, kedua perlakuan yang mengandung *nanobiochar* tidak sekedar menyerap fosfor lebih banyak, tetapi juga mengedarkannya lebih merata ke bagian tanaman yang berperan dalam fotosintesis. Hal ini sejalan dengan peran AMF, yaitu hifa ekstraradikal mampu menjangkau fosfor organic melalui aktivitas mikroba pada hifosfer sehingga serapan fosfor tanman meningkat (Wang et al., 2023). Kombinasi biochar dan AMF juga dilaporkan meningkatkan pemanfaatan fosfor melalui perbaikan jejaring mikroba di rizosfer (Khan et al., 2025).

4.4 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Pertumbuhan Tanaman Uji

4.4.1 Tinggi Tanaman dan Diameter Batang

Seluruh perubahan yang telah dibahas sebelumnya, mulai dari naiknya pH, tertahannya merkuri di dalam media, sampai membaiknya serapan fosfor, pada akhirnya bermuara pada respons pertumbuhan tanaman uji. Pengamatan pertumbuhan tanaman, perlu dilakukan pengukuran tinggi batang, diameter batang, dan biomassa untuk menilai efektivitas penggunaan bahan pembenah tanah pada lahan bekas tambang emas. Hal ini menjadi indikator utama dalam pemantauan pertumbuhan tanaman uji. Penghitungan tiga indikator tersebut dilakukan setiap dua minggu sekali selama periode pengamatan yaitu 18 minggu. Berikut di diagram pertambahan tinggi batang pada tanaman uji selama masa pengamatan:



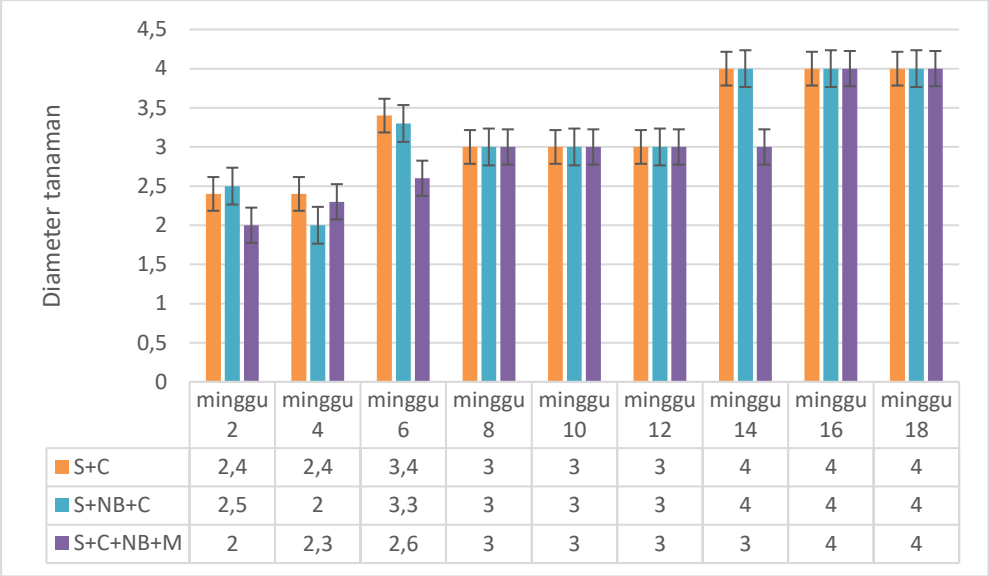
	minggu 2	minggu 4	minggu 6	minggu 8	minggu 10	minggu 12	minggu 14	minggu 16	minggu 18
S+C	40,8	41	50	44	48	48	48	53	54
S+NB+C	40,3	46	52	50	55	56	55	56	60
S+C+NB+M	33,5	37	45	42	49	51	51	54	57

Gambar 4. 8 Pertumbuhan Tinggi Tanaman

Berdasarkan gambar di atas, tinggi awal ketiga perlakuan tidak seragam, yaitu berkisar antara 33,5 cm sampai 40,8 cm. karena itu perbandingan dilakukan memakai pertambahan tinggi, bukan tinggi akhirnya. Perlakuan S+NB+C+M memberikan respons paling besar dengan pertambahan 23,5 cm dari tinggi awal, padahal perlakuan ini justru dimulai dari tanaman yang paling pendek (33,5 cm). Urutan berikutnya adalah S+NB+C sebesar 19,7 cm dan S+C sebesar 13,2 cm. Ketiga perlakuan sama-sama menerima kompops, sehingga selisih tersebut menunjukkan pengaruh tambahan dari *nanobiochar* dan AMF.

Pola pertumbuhan pada grafik tersebut juga memperlihatkan bahwa efektivitas perlakuan baru muncul setelah pertengahan masa percobaan. Sampai pengamatan keempat, S+NB+C+M masih belum sesignifikan dari perlakuan yang lain. Keterlambatan ini bisa terjadi karena AMF membutuhkan waktu untuk mengolonisasi akar sebelum simbiosisnya memberi manfaat nyata bagi tanaman inang . Selain itu, pada pengmatan 1 februari 2026 hampir semua perlakuan mengalami penurunan tingi. Penurunan ini kemungkinan disebabkan patahnya pucuk atau perbedaan titik acuan pengukuran, bukan penyusutan tanman yang sebenarnya.

Pengukuran diameter batang menunjukkan kecenderungan yang searah, seerti yang disajikan pada gambar berikut :



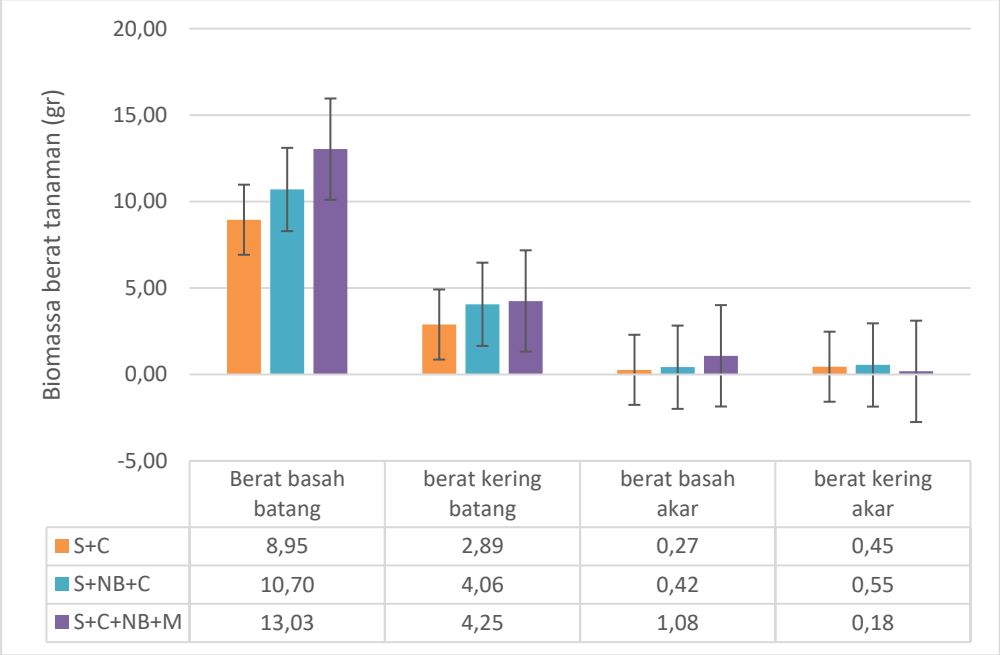
	minggu 2	minggu 4	minggu 6	minggu 8	minggu 10	minggu 12	minggu 14	minggu 16	minggu 18
S+C	2,4	2,4	3,4	3	3	3	4	4	4
S+NB+C	2,5	2	3,3	3	3	3	4	4	4
S+C+NB+M	2	2,3	2,6	3	3	3	3	4	4

Gambar 4. 9 Pertumbuhan Diameter Tanaman

Berdasarkan gambar di atas, pertambahan diameter terbesar dicapai perlakuan S+NB+C+M sebesar 2,0 mm, diikuti S+C sebesar 1,6 mm dan S+NB+C sebesar 1,5 mm. Urutan ini berbeda dari hasil tinggi tanaman, dan selisih antarperlakuan pun sangat tipis, hanya 0,5 mm. Perlu dicatat bahwa sejak pengamatan Februari diameter dicatat dalam bilangan bulat, sehingga perbedaan kecil antarperlakuan kemungkinan besar tidak terekam dan data diameter sebaiknya dibaca sebagai kecenderungan saja. Yang cukup jelas terlihat adalah perlakuan dengan AMF unggul pada pemanjangan maupun penebalan batang. Hal ini bisa dikaitkan dengan hasil pengujian fosfor pada subbab 4.3, sebab AMF membantu meningkatkan penyerapan fosfor melalui perluasan area serapan akar oleh hifa yang menjalar ke dalam tanah, serta menghasilkan asam organic yang membantu melarutkan fosfor terikat. Ketersediaan fosfor yang lebih tinggi kemudian mendorong pembentukan biomassa dan pembesaran diameter batang (Chandrasekaran, 2020).

4.4.2 Biomassa Tanaman Uji

Biomassa tanaman terdiri atas biomassa basah dan biomassa kering. Pengukuran biomassa basah dilakukan setelah dilakukan pemanenan tanaman dengan memisahkan bagian akar dan batang, kemudian menimbangnya. Sementara itu, biomassa kering diperoleh dengan terlebih dahulu mengeringkan tanaman menggunakan oven. Proses pengeringan tanaman uji dilakukan selama 72 jam pada suhu 50°C. Hasil pengukuran disajikan pada grafik berikut :



	Berat basah batang	berat kering batang	berat basah akar	berat kering akar
S+C	8,95	2,89	0,27	0,45
S+NB+C	10,70	4,06	0,42	0,55
S+C+NB+M	13,03	4,25	1,08	0,18

Gambar 4. 10 Biomassa Basah dan Kering Tanaman Uji

Berdasarkan gambar di atas, biomassa kering batang meningkat berurutan mengikuti kelengkapan bahan pembenah, yaitu 2,89 gram pada S+C, 4,06 gram pada S+NB+C, dan 4,25 gram pada S+NB+C+M. jika jaringan batang dan akar dijumlahkan, total berat keringnya berturut-turut 3,34 gram, 4,61 gram, dan 4,43 gram. Karena ketiganya sama-sama mendapat kompos, kenaikan ini menunjukkan bahwa tambahan *nanobiochar* memeang memberi pengaruh nyata terhadap produksi biomassa. Struktur berpori dan luas permukaan spesifik *nanobiochar* yang besar membantu menahan air dan hara sekaligus menyediakan tapak jerapan bagi logam berat, sehingga tanaman bisa mengalokasikan lebih banyak energi untuk tumbuh daripada untuk bertahan

dari cekaman. (Novak et al., 2019). Biochar yang dimodifikasi hingga berukuran nano juga dilaporkan meningkatkan berat kering tajuk maupun akar sekaligus menurunkan serapan logam berat pada kedua jaringan tersebut (Varnaseri Ghandali et al., 2024).

Rasio tajuk terhadap akar naik dari 6,4 pada S+C menjadi 7,4 pada S+NB+C. Kenaikan ini wajar karena tanaman pada media yang lebih ramah tidak perlu mengembangkan akar secara berlebihan untuk mencari hara. Namun nilai 23,6 pada perlakuan S+NB+C+M terlalu ekstrem untuk ditafsirkan apa adanya. Berat kering akarnya hanya 0,18 gram, jauh di bawah kedua perlakuan lain, sehingga besar kemungkinan sebagian akar halus tertinggal di dalam media saat pemanenan. Akar tanaman bermikoriza umumnya lebih halus dan bercabang banyak sehingga lebih rentan putus Ketika dipisahkan dari media.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai potensi nanobiochar, Arbuscuar Mycorrhizal Fungi (AMF), dan kompos ssebagai bahan pembenah tanah pada lahan bekas tambang emas rakyat, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Bahan pembenah tanah berpengaruh terhadap perbaikan kualitas tanah bekas tambang emas rakyat. Perbaikan tersebut diawali dari naiknya derajat keasaman media, yaitu dari pH 4,25 pada S+C menjadi 4,72 pada S+NB+C dan 4,88 pada S+NB+C+M, yang diikuti oleh naiknya kapasitas tukar kation dari 12,02 cmol(+)/kg menjadi 12,74 cmol(+)/kg dan 12,95 cmol(+)/kg. perubahan kondisi tersebut berdampak pada perilaku merkuri, sebab kadar merkuri pada media tanam meningkat berurutan dari 99,29 mg/kg pada S+C menjadi 137,40 mg/kg pada S+NB+C dan 148,13 mg/kg pada S+C+NB+M, sementara kadar merkuri pada akar justri menurun dari 23,70 mg/kg menjadi 16,01 mg/kg dan 12,45 mg/kg. pola yang berlawanan arah tersebut menunjukkan bahwa merkuri tertahan pada fase padat media dan tidak berpindah ke tanaman. Dari sisi hara, fosfor tersedia tertinggi terdapat pada perlakuan S+NB+C sebesar 32,11 mg P_2O_5/100 g. Dengan demikian, perlakuan kombinasi S+NB+C+M memberikan hasil terbaik dalam menaikkan pH media sekaligus menekan perpindahan merkuri dari media ke tanaman, meskipun pH yang dicapai masih berada pada kisaran masam.
2. Bahan pembenah tanah berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman Melaleuca cajuputi. Serapan fosfor ke batang tertinggi terdapat pada perlakuan S+NB+C sebesar 9,92 mg P2O5/100 g, disusul S+NB+C+M sebesar 8,80 mg P2O5/100 g. jauh di atas S+C yang hanya 5,71 mg P2O5/100 g. Perlakuan S+C+NB+M memberikan pertambahan tinggi terbesar, yaitu 23,5 cm dari tinggi awalnya, diikuti S+NB+C sebesar 19,7 cm dan S+C sebesar 13,2 cm. Pertambahan diameter batang terbesar juga dicapai perlakuan S+NB+C+M sebesar 2,0 mm, diikuti S+C sebesar 1,6 mm dan S+NB+C sebesar 1,5 mm, meskipun selisih ketiganya sangat tipis

sehingga hanya dapat dibaca sebagai kecenderungan. Biomassa kering batang meningkat berurutan dari 2,89 g pada S+C menjadi 4,06 g pada S+NB+C dan 4,25 g pada S+NB+C+M. kedua perlakuan yang mengandung nanobiochar dengan demikian konsisten memberikan pertumbuhan yang lebih baik daripada pemberian kompos saja, dan perbaikan pertumbuhan tersebut berjalan seiring dengan naiknya pH media serta berkurangnya merkuri yang terserap ke jaringan tanaman.

3. Dari pola data yang diperoleh dapat dilihat hal apa saja yang terjadi di dalam tanah pada masing-masing perlakuan. Hal ini belum diuji secara statistic sehingga masih perlu dibuktikan pada penelitian selanjutnya. Pada perlakuan S+C, kompos hanya menambah bahan organic dan hara, tetapi tidak mampu mengurangi keasaman pada tanah. Selama kompos terurai justru dilepaskan asam-asam organic, sehingga tanah tetap asam. Dalam kondisi masam, merkuri lebih mudah larut dan terbawa masuk ke dalam akar tanaman. Pada perlakuan S+NB+C, *nanobiochar* diduga bekerja dengan du acara sekaligus. Pertama, sisa abu dari proses pirolisis bersifat basa sehingga menetralkan Sebagian asam di dalam tanah dan pH pun naik. Kedua, permukaanyya yang berpori dan berukuran nano menyediakan banyak tempat menempel bagi merkuri, sehingga logam tersebut tertahan di dalam tanah dan tidak berpindah ke tanaman. Pada perlakuan S+NB+C+M, AMF menambahkan satu lapis perlindungan lagi di bagian akar. Merkuri yang terlanjur masuk akan tertahan pada jaringan jamur di sekitar akar sehingga hanya sedikit yang naik ke batang. Pada saat yang sama, benang-benang hifa yang menjalar di dalam tanah memperluas daerah jelajah akar, sehingga tanaman lebih mudah memperoleh hara terutama fosfor dan pertumbuhannya menjadi paling baik.

5.2 Saran

Berdasarkan pelaksanaan dan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diajukan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Analisis kimia tanah dan jaringan tanaman sebaiknya dilakukan dengan minimal tiga kali ulangan pada setiap perlakuan agar perbedaan antarperlakuan dapat diuji secara statistik, misalnya menggunakan analisis

ragam yang dilanjutkan uji lanjut, sehingga kesimpulan yang ditarik tidak berhenti pada kecenderungan saja.

2. Penelitian selanjutnya perlu menyertakan perlakuan kontrol berupa tanah bekas tambang tanpa bahan pembenah sama sekali, sehingga pengaruh mutlak kompos, nanobiochar, dan AMF dapat diketahui, bukan hanya pengaruh tambahannya terhadap kompos.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelaaziz, H., Elhamzaoui, H., Boularbah, A., Bencherif, K., & Ouhammou, A. (2025). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Their Role in Plant Disease Control: A State of the Art. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1523291. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1523291

Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (3rd ed.). Springer.

Chandrasekaran, M. (2020). A Meta-Analytical Approach on Arbuscular Mycorrhizal Fungi Linoculation Efficiency on Plant Groeth and Nutrient Uptake. Agriculture, 10(9), 370.

Chandra, R., Yadav, S., & Bharagava, R. N. (2023). Advances in Bioremediation of Acid Mine Drainage-Contaminated Soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(12), 33521–33538. https://doi.org/10.1007/s11356-022-25001-3

Dewi, W. (2017). Kajian Kontaminasi Merkuri pada Tanah dan Air di Kawasan Pertambangan Emas Rakyat Kokap, Kulon Progo. *Jurnal Teknik Lingkungan UII*, 13(2), 45–56.

Dhalaria, R., Kumar, H., Nepovimova, E., Kuca, K., Islam, M.T., & Verma, R. (2020). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Potential Agents in Ameliorating Heavy Metal Stress in Plants. Agronomy, 10(6), 815.

Drace, K., Kiefer, A. M., Veiga, M. M., Williams, M. K., Ascari, B., Knapper, K. A., & Hylander, L. D. (2012). Mercury-Free, Small-Scale Artisanal Gold Mining in Mozambique: Utilization of Magnets to Isolate Gold at Clean Tech Mine. *Journal of Cleaner Production*, 32, 88–95. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.022

Hidayati, N., Juhaeti, T., & Syarif, F. (2018). Toleransi beberapa jenis tanaman terhadap sekaman aluminium pada tanah masam. *Jurnal Biologi Indonesia*, 14(1), 45-54.

Hilson, G., & McQuilken, J. (2014). Four Decades of Support for Artisanal and Small-Scale Mining in Sub-Saharan Africa: A Critical Review. *The*

Extractive Industries and Society, 1(1), 104–118. https://doi.org/10.1016/j.exis.2014.01.002

Juliarti, A., Sujatmiko, B., & Wulandari, D. (2022). Kajian Pertumbuhan Melaleuca cajuputi di Lahan Bekas Tambang Batu Bara. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 19(1), 1–14.

Karisma, D., Wulandari, D., & Purnomo, D. (2021). Analisis Kontaminasi Merkuri pada Tailing Tambang Emas Rakyat di Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kulon Progo. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 17(1), 1–12.

Khan, A., Ahmad, M., Iqbal, M., & Ali, S. (2025). Using Biochar, Compost, and Dry Organic Amendments Combined with Mycorrhizae for Heavy Metal Pollution Mitigation in Soil. *Environmental Pollution*, 340, 122875. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122875

Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2020). Remediation Techniques for Heavy Metal-Contaminated Soils: Principles and Applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206–219. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161

Mei, L., Zhu, Y., Zhang, X., Zhou, X., Zhong, Z., Li, H., Li, Y., Li, X., Daud, M. K., Chen, J., & Zhu, S. (2021). Mercury-Induced Phytotoxicity and Responses in Upland Cotton (Gossypium hirsutum L.) Seedlings. Plants, 10(8), 1494.

Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Stress of Heavy Metals. *Biotechnology Advances*, 29(6), 645–653. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.04.006

Mohd, S., Shukla, R., & Garg, S. K. (2013). Phytoremediation Potential of Melaleuca cajuputi for Heavy Metal-Contaminated Soil. *International Journal of Phytoremediation*, 15(4), 357–372. https://doi.org/10.1080/15226514.2012.717103

Narendra, B. H., & Pratiwi. (2021). Penggunaan Tanaman Kayu Putih (Melaleuca cajuputi) untuk Revegetasi Lahan Bekas Tambang. *Buletin Penelitian Hutan*, 682, 35–48.

Novak, J. M., Ippolito, J. A., Watts, D. W., Sigua, G. C., Ducey, T. F., & Johnson, M. G. (2019). Biochar Compost Blends Facilitate Switchgrass Growth in Mine Soils by Reducing Cd and Zn Bioavailibility. Biochar, 1, 97-114.

Prasetyo, T. B., Mulyani, S., & Widyati, E. (2010). Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang Emas dengan Inokulasi Mikoriza Arbuskula pada Semai Acacia mangium di Media Tailing. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 7(3), 289–302.

Pusat Penelitian Tanah (1983). Kriteria Penilaian Sifat Kimia Tanah (Publikasi No. 59). Diakses 28 Juli 2026.

Putra, R. S., Sari, D. M., & Hermawan, B. (2022). Peran AMF dalam Fitoremediasi Logam Berat dan Pertumbuhan Pennisetum purpureum pada Tailing Tambang Emas di Jambi. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 46(1), 67–78.

Ramanayaka, S., Vithanage, M., Alessi, D. S., Liu, W. J., & Mohan, D. (2020). Green Synthesis of Graphitic Nanobiochar for the Removal of Organic and Inorganic Contaminants from Aqueous Media. *RSC Advances*, 10(31), 18062–18074. https://doi.org/10.1039/D0RA03014A

Ramanayaka, S., Wijayawardena, M. A. A., Vithanage, M., & Ok, Y. S. (2022). Nanobiochar for Environmental Applications: A Review. *Biochar*, 4(1), 12. https://doi.org/10.1007/s42773-022-00141-2

Ratna, D. (2024). Chromium Toxicity and Its Remediation Strategies in Plant–Soil Systems. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 1215–1242. https://doi.org/10.1007/s10311-024-01717-9

Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., ... & Wang, X. (2021). Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Induced Mitigation of Heavy Metal Phytotoxicity in Metal-Contaminated Soils: A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123919. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919

Santoso, H., Wulandari, D., & Setiawan, R. (2018). Dampak Pertambangan Emas Rakyat terhadap Lingkungan di Kecamatan Kokap, Kulon Progo. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(1), 22–30.

Sari, R., Kurniawan, B., & Putri, E. (2017). Pengaruh tanah terhadap kelarutan aluminium dan pertumbuhan tanaman pada lahan marginal. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 4(2), 457-464.

Sims, J. T., & Sharpley, A. N. (Eds.). (2005). Phosphorus: Agriculture and the Environment (Agronomy Monograph No. 46). Madison: American Society

of Agronomy, Crop Science Society of America, dan Soil Science Society of America.

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metal Toxicity and the Environment. *Experientia Supplementum*, 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Umeobi, E. C., Ducey, T. F., Johnson, M. G., & Ippolito, J. A. (2025). Soil Health Alterations via Compost Additions to natural and Remediated Heavy Metal-Contaminated Mineland Soils. Environmental Science And Pollution Research.

UNEP. (2019). *Global Mercury Assessment 2018*. United Nations Environment Programme, Chemicals and Health Branch.

Usman, K., Khan, S., Ghulam, S., Khan, M. U., Khan, N., Khan, M. A., & Khalil, S. K. (2023). Chromium Toxicity, Speciation, and Remediation Strategies in Soil–Plant Interface: A Critical Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1001979. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1001979

Utami, S. R., handayanto, E., & Utomo, W. H. (2019). Peran bahan organik dalam menurunkan kelarutan aluminium pada tanah masam. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 43(1), 33-40.

Varnaseri Ghandali, M., Safarzadeh, S., Ghasemi-Fasaei, R., & Zeinali, S. (2024). Heavy Metals Immobilization and Bioavailibility in Multi-Metal Contaminated Soil under Ryegrass Cultivation as Affected by ZnO and MnO2 Nanoparticle-Modified Biochar. Scientific Reports, 14, 10684.

Vidali, M. (2016). Bioremediation: An Overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172. https://doi.org/10.1351/pac200173071163

Wang, L., Rinklebe, J., Tack, F. M. G., & Hou, D. (2021). A Review of Bioremediation Application to Remediate Chromium-Contaminated Soils and Sediments Using Microorganisms and Plants. *Ecological Engineering*, 165, 106231. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106231

Wijayanti, R., Sari, N., & Kurniawan, A. (2016). Kajian Budidaya Kayu Putih (Melaleuca cajuputi) di Lahan Bekas Tambang PT Bukit Asam, Sumatera Selatan. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 5(2), 155–166.

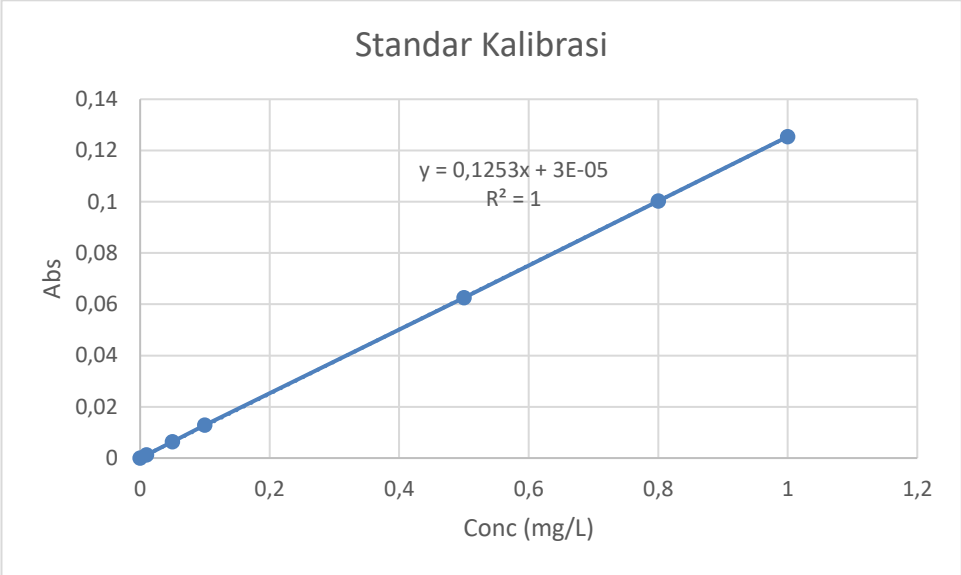
Zhang, C., Shan, B., Tang, W., Zhu, Y., & Wen, J. (2022). Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using Biochar: A Meta-Analysis. *Science of the Total Environment*, 851, 158109. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158109

Zheng, X., Wang, X., Chen, Z., & Liu, H. (2025). Role of Biochar-Based Nanocomposites in Soil Remediation, Heavy Metal Immobilization and Ecological Safety. *Environmental Research*, 240, 117478. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117478

LAMPIRAN

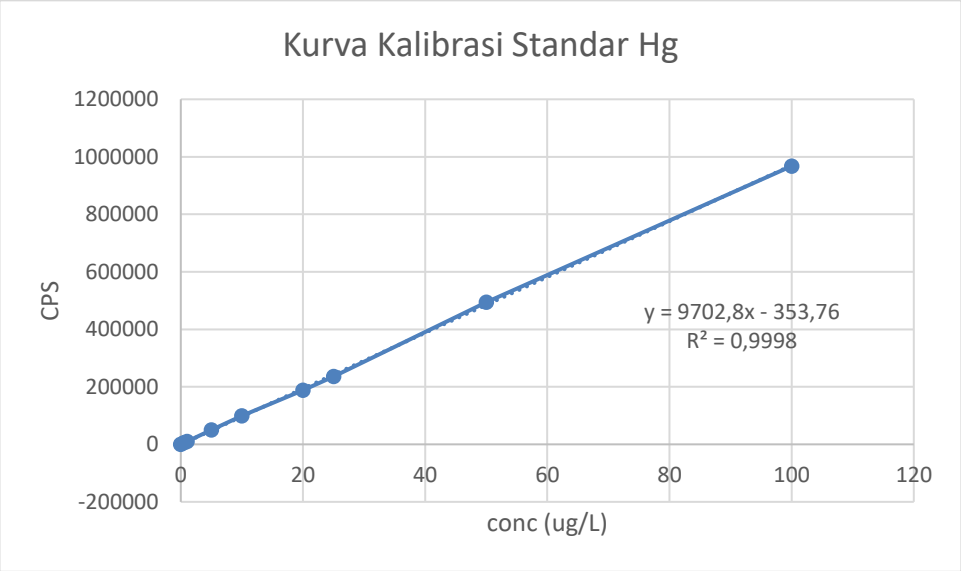
Lampiran 1 Kurva Kalibrasi

Kurva Kalibrasi P2O5



Deret Standar				
No	**Standar**	**conc (ug/L)**	**Abs**	**K.Abs**
1	standar 1	0	0	0
2	standar 2	0,01	0,0012	0,0012
3	standar 3	0,05	0,0063	0,0063
4	standar 4	0,1	0,0128	0,0128
5	standar 5	0,5	0,0625	0,0625
6	standar 6	0,8	0,1003	0,1003
7	standar 7	1	0,1254	0,1254
slope (a)		0,1253088		
intercept (b)		0,0000343		

Kurva Kalibrasi Hg



Deret Standar Uji Hg			
No.	**Standar**	**Cons (ug/L)**	**CPS**
1	Standar 1	0	0
2	Standar 2	0,5	4950,8
3	Standar 3	1	9900,7
4	Standar 4	5	49504,0
5	Standar 5	10	98824,5
6	Standar 6	20	188144,2
7	Standar 7	25	236056,2
8	Standar 8	50	493795,7
9	Standar 9	100	967784,6
slope (a)		9790,7397	
intercept (b)		-353,7594262	

Contoh Perhitungan

A. Perhitungan Kandungan Nutrisi Fosfor (P) pada Tanah dengan Metode Bray I

Kombinasi Tanah + Sekam Padi + Nanobiochar +Kompos+Mychorriza (S+NB+C+M)

Dik :

Slope (a) = 0,1253

Intersep (b) = 0,0000343

Absorbansi sampel (y)	= 0,06
Faktor pengenceran (fp)	= 20
Faktor koreksi kadar air (fk)	= 1
Volume ekstrak	= 10
Berat sampel yang digunakan	= 2,5118
Faktor konversi PO_4 menjadi P_2O_5	= 142/190

a. Perhitungan Kadar P (ppm)

Kadar P = $\frac{(y-b)}{a}$

= $\frac{(0{,}06-(0{,}0000343))}{0{,}1253}$

= 0,479 ppm

b. Perhitungan P_2O_5 Tersedia

P teredia (ppm) = ppm kurva × $\frac{ml\ ekstrak}{1000\ ml}$ × $\frac{1000\ \text{g}}{g\ contoh}$ × x fp × f.konversi PO_4 ke P_2O_5× fk

= 0,479 ppm × $\frac{10\ ml}{1000\ ml}$ × $\frac{1000\ \text{g}}{2.5118\ g}$ × 20 × $\frac{142}{190}$ × 1

= 28,50 mg/kg

B. Perhitungan Kandungan Nutrisi Fosfor (P) pada Jaringan Tanaman dengan Metode HCl 25%

Pada Jaringan Batang Tanaman dengan Kombinasi Perlakuan Tanah + Sekam Padi + Nanobiochar + Kompos + Mychorriza (S+NB+C+M)

Dik :

Slope (a)	= 0,1253
Intersep (b)	= 0,0000343
Absorbansi sampel (y)	= 0,052
Faktor pengenceran (fp)	= 20
Faktor koreksi kadar air (fk)	= 1,04
Volume ekstrak	= 10
Berat sampel yang digunakan	= 1,67
Faktor konversi PO_4 menjadi P_2O_5	= 142/190

a. Perhitungan Kadar P (ppm)

Kadar P = $\frac{(y-b)}{a}$

= $\frac{(0{,}052-(0{,}0000343))}{0{,}1253}$

= 0,415 ppm

b. Perhitungan P_2O_5 Total (mg/100g)

P (mg P_2O_5 100 g^{-1}) = 0,415 × $\frac{10\ ml}{1000\ ml}$ × $\frac{100\ g}{gr\ contoh}$ × fp × f.konversi PO_4 ke P_2O_5× fk

= 0,415 × $\frac{10\ ml}{1000}$ × $\frac{100\ g}{1{,}67\ g}$ × 20 × $\frac{142}{190}$ × 1,04

= 3,86 mg/100g

C. Perhitungan Kadar Merkuri (Hg) pada Tanah

Kombinasi Tanah + Sekam Padi + Nanobiochar + Kompos + Mychorriza (S+NB+C + M)

Dik :

Konsentrasi (C)	= 0,015287
Volume akhir destruksi (V) ml	= 50
Berat contoh uji (W) g	= 0,52
Fraksi padat (P)	= 1
Faktor pengenceran (fp)	= 100

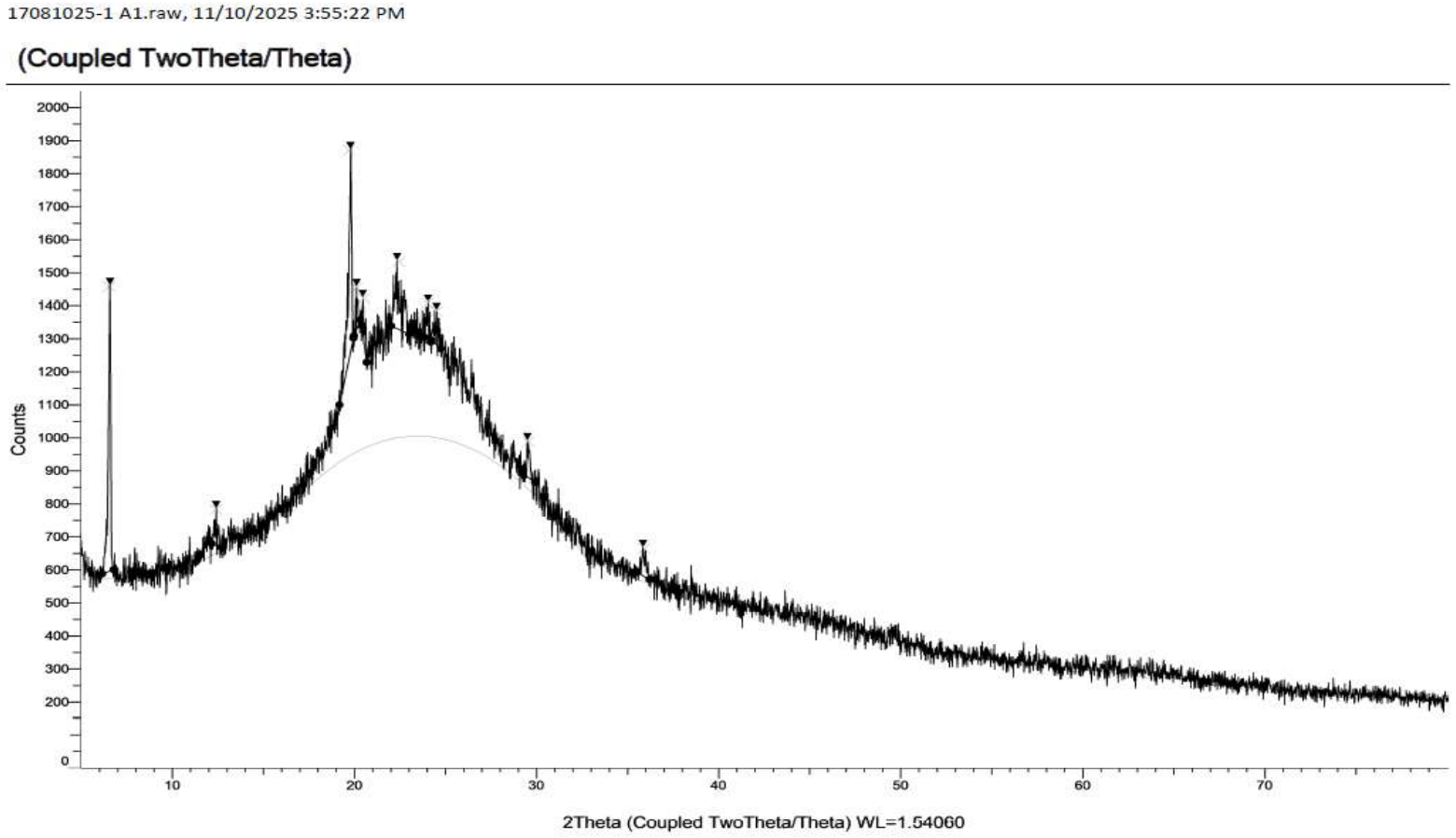
Perhitungan :

kadar logam (mg/kg) = $\frac{C \times V}{W \times P}$ × fp

= $\frac{0{,}015287 \times 50}{0{,}52 \times 1}$ × 100

=146,99 mg/kg

Grafik XRD


17081025-1 A1.raw, 11/10/2025 3:55:22 PM
(Coupled TwoTheta/Theta)
Counts
2000
1900
1800
1700
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
0
10
20
30
40
50
60
70
2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1.54060

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

Visible	Icon	Color	Index	Name	Parent	Scan	Left Angle	Right Angle
Yes			1	[6.160 ° - 6.790 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	6.160 °	6.790 °
Yes			2	[12.173 ° - 12.701 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	12.173 °	12.701 °
Yes			3	[19.181 ° - 19.953 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	19.181 °	19.953 °
Yes			4	[19.973 ° - 20.318 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	19.973 °	20.318 °
Yes			5	[20.399 ° - 20.684 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	20.399 °	20.684 °
Yes			6	[22.025 ° - 23.020 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	22.025 °	23.020 °
Yes			9	[23.873 ° - 24.198 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	23.873 °	24.198 °
Yes			10	[24.239 ° - 24.767 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	24.239 °	24.767 °
Yes			8	[29.236 ° - 29.926 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	29.236 °	29.926 °
Yes			7	[35.512 ° - 36.203 °]	Area List #1	17081025-1 A1.raw #1	35.512 °	36.203 °

Left Int.	Right Int.	Obs. Max	d (Obs. Max)	Gross Int.	Net Height	FWHM	Chord Mid.	d (Chord Mid.)	I. Breadth
8.96	9.15	6.576 °	13.42996 Å	22.2	13.1	0.139	6.564 °	13.45564 Å	0.156
10.4	10.2	12.414 °	7.12447 Å	11.9	1.65	0.175	12.422 °	7.12012 Å	0.137
16.8	19.8	19.793 °	4.48181 Å	28.5	9.31	0.163	19.778 °	4.48518 Å	0.208
19.9	20.7	20.120 °	4.40987 Å	22.2	1.92	0.115	20.141 °	4.40513 Å	0.074
20.4	18.7	20.467 °	4.33588 Å	21.7	1.64	0.153	20.500 °	4.32899 Å	0.154
20.4	20.0	22.337 °	3.97694 Å	23.4	3.10	0.327	22.394 °	3.96684 Å	0.340
19.9	19.7	24.041 °	3.69869 Å	21.4	1.68	0.000	0.000 °		0.150
19.7	19.4	24.519 °	3.62769 Å	21.1	1.53	0.234	24.520 °	3.62755 Å	0.182
13.6	13.2	29.495 °	3.02596 Å	15.1	1.62	0.183	29.564 °	3.01911 Å	0.157
9.03	8.71	35.847 °	2.50304 Å	10.1	1.26	0.303	35.882 °	2.50068 Å	0.253

Gravity C.	d (Gravity C.)	Raw Area	Net Area	C. Size	K	Instr. Width	Use I. Breadth
6.530 °	13.52521 Å	7.754	2.050	638.1 Å	1.000	0.000	No
12.399 °	7.13278 Å	5.648	0.2257	506.8 Å	1.000	0.000	No
19.700 °	4.50288 Å	16.06	1.933	551.2 Å	1.000	0.000	No
20.135 °	4.40660 Å	7.157	0.1419	778.5 Å	1.000	0.000	No
20.533 °	4.32199 Å	5.821	0.2531	588.1 Å	1.000	0.000	No
22.455 °	3.95627 Å	21.17	1.051	275.1 Å	1.000	0.000	No
24.026 °	3.70100 Å	6.678	0.2527	0.0 Å	1.000	0.000	No
24.494 °	3.63138 Å	10.60	0.2795	385.2 Å	1.000	0.000	No
29.551 °	3.02043 Å	9.502	0.2542	499.9 Å	1.000	0.000	No
35.900 °	2.49944 Å	6.445	0.3185	306.1 Å	1.000	0.000	No

Lampiran 2 Dokumentasi Kegiatan



Alat sterilisasi



AMF



Penghancuran tanah



Penambahan *Nano Biochar*



proses setelah penanaman



Penimbangan berat basah batang



Proses pemanenan



Proses foto tanaman



Foto perbandingan tanaman



Amplop berisikan batang dan akar



Proses destruksi tanah



Proses pengujian kadar P



Hasil destruksi



Pembacaan kadar logam

RIWAYAT HIDUP



Khairunnisa Adistya Putri Hidayanti, biasa dipanggil Nisa. Lahir di Palembang 20 September 2004, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah melalui jenjang pendidikan di SDN 002 Rengat, SMP Negeri 1 Rengat, kemudian melanjutkan SMA Negeri 1 Rengat, dan menempuh pendidikan program studi S1 Teknik Lingkungan di Universitas Islam Indonesia di Yogyakarta.

Selama masa perkuliahan penulis aktif berkontribusi dan berlembaga seperti menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) sebagai Sekretaris Departemen Kewirausahaan pada periode pertama dan Departemen Dalam Negeri pada periode kedua. Penulis juga mengikuti kegiatan kepanitiaan dengan menjadi bagian dalam penyelenggaraan kegiatan *Enviro Champions* 2023, Latihan dasar Kepemimpinan (LDK), dan Lintas Lingkungan 2023. Pada bulan februari 2026 penulis telah menyelesaikan Kerja Praktik di PT. Pupuk Sriwidjaja, Palembang di Departemen Lingkungan Hidup. Pada bulan april 2026 penulis memulai penelitian di *greenhouse* Bu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. dan Laboratorium Kualitas Lingkungan untuk menyelesaikan tugas akhir.