TA/TL/2026/2135

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

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

Shinta Maharani Dewi
22513038

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 Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2026

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Potential of Nano Biochar and Arbscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Former Gold Mining Land in Kulon Progo, Special Region of Yogyakarta.

Shinta Maharani Dewi
22513038

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

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Civil Engineering and Planning
Universitas Islam Indonesia
2026

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Potensi *Nano Biochar* dan *Arbsular Mycorrhizal Fungi* (AMF) 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.

Shinta Maharani Dewi

20513038

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

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

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

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

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI
YOGYAKARTA

31/8-2026.

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

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

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

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

Yogyakarta, 28 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Sninta Manarani Dewi

22513038

PRAKATA

Puji dan syukur tak hentinya penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan nikmat yang telah diberikan, sehingga penulis mampu menuntaskan penyusunan tugas akhir ini dengan baik. Maka dari itu, melalui kesempatan ini, penulis menuangkan ucapan terima kasih yang setulus – ulusnya kepada semua pihak yang telah mendampingi selama proses penulisan ini. ucapan terima kasih ini penulis sampaikan kepada :

1. Allah SWT, atas segala rahmat dan ridho-Nya yang memungkinkan penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini hingga tuntas.
2. Kedua orang tua yang melakukan segala cara demi penulis dapat menyelesaikan pendidikan ini, yang selalu mendoakan, memberikan dukungan dan motivasi, dengan penuh rasa sayang dan bangga penulis mempersembahkan tulisan ini untuk hari demi hari yang dihabiskan, rupiah yang tidak sedikit, keringat dan air mata dari mereka yang terkasih.
3. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. dan Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc.Ph.D. selaku dosen pembimbing, serta tak lupa Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji yang dengan tulus telah meluangkan waktunya serta memberikan arahan untuk penulis dapat menyempurnakan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh Bapak/Ibu Dosen dan staf laboratorium Kualitas Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan banyak pembelajaran dan ilmu yang berharga.
5. Kepada mereka para sahabat penulis yang menjadi bagian dari keseharian, mereka yang menghibur, mereka yang membersamai, mereka yang paham perjuangan dan pengorbanan, serta mereka yang sudah seperti saudara, yang telah memberikan dukungan dan bantuan hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan hati yang tenang dan lapang.

6. Teruntuk ia sang kakak sekaligus sang adik, ia yang selalu menjadi “diantara”, ia yang berjuang untuk nama dan senyumnya, dan ia yang selalu berusaha memenuhi apa yang kurang bagi mereka yang terkasih. Dengan tulisan ini penulis ucapkan bangga setulus hati untuk sedikit keberhasilan yang kita raih kali ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan Tugas Akhir ini masih memiliki beberapa kekurangan. Maka dari itu, penulis sangat mengharapkan adanya saran dan kritik yang membangun untuk menyempurnakan laporan Tugas Akhir ini. tulisan ini bertujuan untuk dapat menjadi sumber informasi bagi para pembaca dan sebagai bahan referensi bagi mereka peneliti selanjutnya.

Sleman, 28 Juli 2026

Shinta Maharani Dewi

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

Mahasiswa : Shinta Maharani Dewi
NIM : 2251338
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Dosen Pembimbing I : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Puji Lestari, S.Si., M.Sc.Ph.D.

Abstrak

Kegiatan penambangan emas rakyat berpotensi menyebabkan pencemaran logam berat merkuri (Hg) yang menurunkan kualitas tanah dan menghambat pertumbuhan tanaman. Salah satu alternatif remediasi adalah pemanfaatan nano biochar dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) yang mampu mengurangi mobilitas logam berat sekaligus meningkatkan ketersediaan unsur hara. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi *nano biochar* dan AMF dalam memperbaiki kualitas tanah bekas tambang emas menggunakan *Melaluca cajuputi* di Kulon Progo, DIY. Penelitian menggunakan beberapa perlakuan, yaitu kontrol (S), nano biochar (S+NB), dan kombinasi nano biochar dengan AMF (S+NB+M). Parameter yang dianalisis meliputi kandungan pH, Hg pada tanah dan jaringan tanaman, kandungan P_2O_5 pada tanah dan tanaman, serta tinggi tanaman, diameter batang, dan biomassa tanaman. Hasil penelitian menunjukkan pH tanah meningkat dari 3,11 (*post mining*) menjadi 4,67 (S+NB+M). Kadar Hg tanah yang meningkat seiring penambahan bahan pembenah, Hg pada akar menurun dari 34,69 mg/kg menjadi 18,44 mg/kg. Hg pada batang menurun dari 12,57 menjadi paling rendah yakni 10,41 mg/kg. kadar P_2O_5 tanah meningkat dari 2,5 menjadi 28,24 mg/kg. diameter batang mencapai 5 mm (S+NB+M) pada minggu ke 18, dengan berat kering 6,4 gr. Kombinasi S+NB+M terbukti paling efektif menurunkan bioavabilitas Hg sehingga mengurangi akumulasinya pada jaringan tanaman. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi tersebut berpotensi menjadi teknologi remediasi yang efektif untuk memperbaiki kualitas tanah tercemar Hg, juga mendukung revegetasi lahan bekas tambang emas rakyat.

Kata kunci: *Nano Biochar, Aebuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), merkuri (Hg), tanah bekas tambang emas, Melaluca cajuputi, remediasi tanah.*

Potential of Nano Biochar and Abuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Former People's Gold Mining Land in Kulon Progo, Yogyakarta

Student	: Shinta Maharani Dewi
Student Number	: 22513038
Study Program	: Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor I	: Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.
Supervisor II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc.Ph.D.

Abstract

Artisanal gold mining activities have the potential to cause heavy metal mercury (Hg) contamination, which degrades soil quality and inhibits plant growth. One alternative remediation approach is the use of nano biochar and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), which can reduce heavy metal mobility while increasing nutrient availability. This study aimed to analyze the potential of nano biochar and AMF in improving the quality of former gold mining soil using *Melaleuca cajuputi* in Kulon Progo, Special Region of Yogyakarta. The study employed several treatments, namely control (S), nano biochar (S+NB), and a combination of nano biochar with AMF (S+NB+M). The parameters analyzed included soil pH, Hg content in soil and plant tissue, P_2O_5 content in soil and plant tissue, as well as plant height, stem diameter, and plant biomass. The results showed that soil pH increased from 3.11 (post-mining) to 4.67 (S+NB+M). Soil Hg content increased with the addition of amendments, while root Hg decreased from 34.69 mg/kg to 18.44 mg/kg. Stem Hg decreased from 12.57 to its lowest value of 10.41 mg/kg. Soil P_2O_5 content increased from 2.5 to 28.24 mg/kg. Stem diameter reached 5 mm (S+NB+M) at week 18, with a dry weight of 6.4 g. The S+NB+M combination proved most effective in reducing Hg bioavailability, thereby lowering its accumulation in plant tissue. These results indicate that this combination has the potential to become an effective remediation technology for improving mercury-contaminated soil, while also supporting the revegetation of former artisanal gold mining land.

Key words: ano biochar, *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), mercury, former gold mining soil, *Melaluca cajuputi*, soil remediation.

DAFTAR ISI

PRAKATA i
Abstrak iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR TABEL vii
DAFTAR GAMBAR viii
DAFTAR LAMPIRAN ix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Ruang Lingkup 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Tambang Emas Tradisional 5
2.2 Karakteristik Tanah Tambang 5
2.3 Logam Berat di Tambang Emas 6
2.3.1 Merkuri (Hg) 7
2.4 Nutrisi tanah dan tanaman 7
2.4.1 Fosfor (P) 8
2.5 Remediasi Tanah 8
2.5.1 Arang Sekam Padi 8
2.5.2 Nano Biochar 9
2.5.3 *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) 9
2.6 *Melaluca cajuputi* 10
2.7 Penelitian Terdahulu 11
2.8 Hipotesis Penelitian 12
2.8.1 Hipotesis terhadap pH Tanah 12

2.8.2 Hipotesis terhadap kadar Merkuri (Hg) pada Tanah 13
2.8.3 Hipotesis terhadap kadar Merkuri (Hg) pada Jaringan Tanaman 13
2.8.4 Hipotesis terhadap kadar P_2O_5 pada Tanah 13
2.8.5 Hipotesis terhadap kadar P_2O_5 pada Tanaman 14
2.8.6 Hipotesis terhadap Pertumuhan dan Biomassa Tanaman 14
BAB III METODE PENELITIAN 15
3.1 Waktu dan Lokasi 15
3.2 Alat dan Bahan 16
3.3 Prosedur Analisis Data 17
3.3.1 Pengambilan Sampel Tanah 18
3.3.2 Penambahan Nano biochar (NB) 18
3.3.3 Inokulasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) 19
3.3.4 Persiapan Media Tanam 19
3.3.5 Penanaman 20
3.3.6 Penyiraman dan Perawatan 21
3.3.7 Pengambilan Data Pertumbuhan 22
3.3.8 Pemanenan 22
3.3.7 Uji Lab 23
3.3.9 Analisis Data 23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 25
4.1 Hasil Pengujian pH Tanah 25
4.2 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Logam Merkuri (Hg).. 26
4.2.1 Reduksi Logam Merkuri (Hg) pada Tanah Polybag 27
4.2.2 Reduksi Logam Merkuri (Hg) pada Tanaman 28
4.3 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Nutrisi P_2O_5 30
4.3.1 Peningkatan Kandungan P_2O_5 pada Tanah Polybag 30
4.3.2 Peningkatan Kandungan P_2O_5 pada Tanaman 32
4.4 Pengaruh Pembenah Tanah Terhadap Pertumbuhan Tanaman 34
4.4.1 Tinggi Tanaman 35
4.4.2 Diameter Tanaman 37
4.4.3 Biomassa Tanaman Uji 38

BAB V PENUTUP 40
5.1 Kesimpulan 40
5.2 Saran 40
DAFTAR PUSTAKA 42
LAMPIRAN 47
RIWAYAT HIDUP 55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu 11

Tabel 3.1 Alat..... 16
Tabel 3.2 Bahan 16
Tabel 3.3 Kode perlakuan tanaman 20

Tabel 4.1 Tabel Kategori Kadar P_2O_5 (mg/kg) pada Tanah 31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tanaman *Melaluca cajuputi*..... 10

Gambar 3.1 Lokasi Pengambilan Sampel..... 15
Gambar 3.2 Prosedur Analisis Data..... 17
Gambar 3.3 Pengambilan Sampel Tanah..... 18
Gambar 3.4 Penambahan Nanobiochar..... 18
Gambar 3.5 Inokulasi AMF..... 19
Gambar 3.6 Landfarming Tanah Bekas Tambang..... 20
Gambar 3.7 Proses penanaman..... 21
Gambar 3.8 Penyemprotan Fungisida dan Penyiraman Tanaman..... 22
Gambar 3.9 Pengukuran Diameter Batang dan Tinggi Tanaman..... 22
Gambar 3.10 Pemanenan tanaman..... 23
Gambar 3.11 Pengujian sampel..... 23

Gambar 4.1 Kadar pH pada tanah polybag..... 25
Gambar 4.2 Kadar Hg pada Tanah Polybag..... 27
Gambar 4.3 Kadar Hg pada Akar..... 28
Gambar 4.4 Kadar Hg pada Batang..... 29
Gambar 4.5 Kadar P2O5 pada Tanah Polybag..... 31
Gambar 4.6 Kadar P_2O_5 pada Akar..... 32
Gambar 4.7 Kadar P_2O_5 pada Batang..... 33
Gambar 4.8 Perbandingan Tinggi Tanaman..... 35
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Tinggi Tanaman..... 35
Gambar 4.10 Perbandingan Diameter Tanaman..... 37
Gambar 4.11 Biomassa Tanaman..... 38

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Standar Hg 47
Lampiran 2 Kurva Kalibrasi Standar P 48
Lampiran 3 Contoh Perhitungan 49
Lampiran 4 Grafik XRD Nanobiochar 51
Lampiran 5 Dokumentasi Kegiatan 55

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Emas merupakan satu dari hasil pertambangan yang sangat penting pada aspek ekonomi sebuah wilayah. Tercatat Indonesia memiliki cadangan mineral emas yang besar di berbagai daerah, seperti Sumatera, Kalimantan, hingga Papua. Disamping pertambangan emas skala industri, aktivitas pertambangan emas tradisional atau skala kecil telah lebih dulu ada dan dilakukan dari generasi ke generasi serta menjadi salah satu sumber mata pencaharian utama dan pendorong perekonomian masyarakat lokal (Santoso, 2018). Salah satunya pada Kecamatan Kokap, Kulon Progo, DIY, yang memiliki kandungan emas yang cukup signifikan dari seluruh wilayah di DIY.

Kegiatan penambangan emas tradisional pada Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo ini menggunakan metode amalgamasi yang mencampurkan merkuri (Hg) dengan bijih emas dan dilakukan di dalam gelondong. yang mana penggunaan merkuri ini menimbulkan dampak pencemaran yang serius pada lingkungan perairan di sekitarnya serta dapat mengancam kesehatan masyarakat (Indra, 2022). Meskipun metode ini tidak memerlukan banyak biaya, secara aspek lingkungan penambangan emas tradisional atau dalam skala kecil memberikan dampak yang cukup besar bagi lingkungan.

Kegiatan penambangan emas rakyat menggunakan merkuri tentunya menimbulkan dampak bagi lingkungan yang dapat terlihat langsung, seperti degradasi tanah, tercemarnya sumber air tanah, dan meningkatnya sedimentasi dungai dan perubahan tata guna lahan (Mycelia Paradise, 2023). Kondisi tersebut menjadikan lahan bekas tambang tidak dapat digunakan sebagaimana fungsinya secara produktif dan memerlukan upaya remediasi yang spesifik untuk mengembalikan kondisi tanah. Hasil dari penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa limbah dari metode amalgamasi di kawasan Kokap telah mencemari ekosistem Sungai Plampang dan Sungai Sangon dengan hasil logam berat yang melebihi baku mutu air sungai (Dewi, 2017). Dari beberapa permasalahan yang ada

menegaskan bahwa lahan bekas tambang yang ada di wilayah Kokap, DIY ini memerlukan adanya perlakuan remediasi yang komprehensif dan berkelanjutan.

Berbagai penelitian terdahulu telah mencoba banyak pendekatan bioremediasi, pengaplikasian mikoriza arbuskula pada semai *Acacia mangium* di media tailing tambang yang menghasilkan adanya peningkatan pertumbuhan tanaman pada tanah yang telah terkontaminasi (Prasetyo et al., 2010). Dengan penambahan *nano biochar* pada proses remediasi mengefektifkan dalam mengadsorpsi kontaminan logam berat dan senyawa organik persisten dari media air dan tanah yang tercemar (Ramanayaka et al., 2020). Perkembangan teknologi remediasi tanah tercemar logam berat dengan menggunakan biochar berlangsung cukup pesat, dengan prinsip kerja yang mencakup adsorpsi fisik, pertukaran ion, interaksi elektrostatik, kompleksasi hingga presipitasi. Berbagai pengujian pula menunjukkan bahwa mekanisme tersebut efektif menurunkan kadar logam berat pada tanah yang terkontaminasi (Shinta et al., 2021). Disisi lain, tanaman kayu putih yang memiliki daya tahan terhadap kondisi air asam dinilai sebagai piihan yang tepat untuk mendukung program revegetasi pada lahan bekas tambang emas (Mawaddah et al., 2012). Temuan penelitian terdahulu ini kemudian menjadi dasar ilmiah untuk dilakukannya percobaan kombinatorial antara nano biochar, mikoriza, serta penggunaan tanaman bertoleransi tinggi terhadap logam berat pada upaya revegetasi.

Nano biochar adalah *biochar* berukuran partikel < 100 nm yang didapat dari proses pirolisis biomassa dengan kondisi terbatas oksigen, diikuti dengan proses penggilingan energi tinggi atau modifikasi kimia untuk mereduksi ukuran partikel. Karakternya yang memiliki porositas yang tinggi, aktivitas katalitik yang lebih kuat dan reaktivitas permukaan yang meningkat secara substansial menjadikan *nano biochar* lebih efektif dalam mereduksi logam berat di dalam tanah melalui mekanisme adsorpsi elektrostatik, pertukaran ion, kompleksasi permukaan dan kopresipitasi (Zheng et al., 2025).

Arbuscular mycorrhizal Fungi (AMF) adalah jenis jamur yang memiliki dua mekanisme utama dalam meremediasi lahan yang tercemar logam berat, yakni secara langsung dengan mengikat logam berat pada struktur fungal, dan secara tidak langsung dengan meningkatkan biomassa tanaman, mendorong produksi

antioksidan serta mengubah morfologi dari akar sehingga hal ini meningkatkan efisiensi dari fitoremediasi (Miransari, 2011). AMF pada berbagai tanaman uji terbukti menurunkan konsentrasi logam Pb, Cd, Zn, dan Ni dalam jaringan pucuk tanaman. AMF dapat memperbaiki sifat fisik tanah dengan memproduksi glomalin yang bertindak sebagai agen pengikat agregat tanah dan mendukung peningkatan unsur hara pada tanah.

Melaluca cajuputi atau yang biasa dikenal sebagai tanaman kayu putih tergolong kedalam jenis tanaman yang mampu hidup di tanah yang kering serta tidak memiliki syarat tumbuh yang spesifik (Mohd et al., 2013). *Melaluca cajuputi* juga memiliki nilai ekonomi yang didapat melalui produksi minyak atsirinya sehingga revegetasi dengan *Melaluca cajuputi* tidak hanya dapat memberikan dampak ekologis tapi berdampak pula pada aspek ekonomi bagi masyarakat di sekitar kawasan tambang.

Berdasarkan uraian di atas, penulis mendapatkan motivasi yang lebih untuk melakukan penelitian mengenai Potensi Kombinasi *Nano Biochar* dan AMF pada *Melaluca cajuputi* di bekas tambang emas rakyat di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta yang dirasa urgen dan strategis, mengingat belum adanya kajian spesifik yang mengintegrasikan ketiga komponen tersebut sebagai satu pendekatan yang baru dalam pemulihan ekosistem lahan terdegradasi di wilayah tersebut. Maka dari itu hal ini penting untuk dilakukan untuk mengkaji lebih terkait potensi dari kombinasi *Nano Biochar* dan AMF dalam memperbaiki kualitas bekas tanah tambang emas rakyat menggunakan tanaman *Melaluca cajuputi* pada tanah bekas tambang emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana potensi bahan pembenah tanah seperti *Nano Biochar* dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) terhadap perbaikan kualitas tanah bekas tambang emas rakyat dengan tanaman *Melaluca cajuputi* sebagai parameter?

2. Bagaimana potensi bahan pembenah tanah seperti *Nano Biochar* dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) terhadap pertumbuhan tanaman *Melaluca cajuputi* sebagai parameter?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu, sebagai berikut :

1. Menganalisis potensi bahan pembenah tanah yakni *Nano Biochar* dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) terhadap perbaikan kualitas tanah serta mengurangi tingkat pencemaran tanah.
2. Menganalisis potensi bahan pembenah tanah seperti *Nano Biochar* dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) terhadap pertumbuhan tanaman *Melaluca cajuputi*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

1.5 Ruang Lingkup

Batasan pembahasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tambang Emas Tradisional

Pertambangan emas tradisional adalah kegiatan penambangan yang dilakukan oleh masyarakat skala kecil dengan teknologi yang sederhana. Kegiatan ini tidak memerlukan modal awal yang besar, sehingga menjadi sumber mata pencaharian masyarakat lokal (Hilson & McQuilken, 2014). Kegiatan ini diteruskan dari generasi ke generasi sebagai pekerjaan yang dapat menunjang perekonomian kehidupan masyarakat. Kegiatan pertambangan emas ini dilakukan secara berkelompok, mulai dari proses pemecahan batu hingga menghasilkan butiran emas.

Kegiatan ini tentunya memiliki dampak negatif terhadap ekosistem tanah, air serta kesehatan masyarakat sekitar, karena dalam prosesnya kegiatan ini menggunakan metode amalgamasi, yakni proses pemisahan emas dari bijinya menggunakan merkuri (Hg). Dalam metode ini, merkuri dicampurkan dengan material bijih emas sehingga menghasilkan amalgam yang nantinya dipanaskan untuk memperoleh logam emas (Drace et al., 2012). Proses ini murah dan mudah dilakukan, sehingga menjadi pilihan yang banyak digunakan oleh masyarakat yang masih melakukan kegiatan penambangan secara tradisional.

Pada wilayah Kokap, DIY merupakan salah satu wilayah yang mengalami dampak dari aktivitas pertambangan emas tradisional. Penelitian sebelumnya pula menunjukan bahwa limbah hasil pengolahan emas di wilayah tersebut berpotensi mencemari badan air dan tanah dengan kandungan logam berat yang melebihi baku mutu lingkungan yang ditetapkan (Dewi, 2017).

2.2 Karakteristik Tanah Tambang

Tanah bekas tambang biasanya terjadi degradasi parah yang disebabkan dari proses penggalian, pengerukan tanah lapisan atas, dan pemadatan yang dilakukan oleh alat berat. Degradasi ini membawa dampak turunnya porositas, permeabilitas dan kemampuan tanah untuk menahan air, sehingga tanah rentan akan erosi

(Sheoran et al., 2010). Kondisi fisik ini berdampak mejadi hambatan awal sebelum pemulihan dilakukan dengan proses kimia dan biologis berlangsung dengan efektif.

Secara kimiawi, tanah bekas tambang emas mengandung kontaminan logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb) dan sianida yang berasal dari proses ekstraksi biji emas. Proses oksidasi mineral sulfida terutama pirit (FeS_2) yang menghasilkan *Acid Mine Drainage* (AMD) yang menyebabkan pH tanah turun jauh di bawah rentang optimal pertumbuhan tanaman (pH 6-7) (Akcil & Koldas, 2006). Kecilnya nilai pH ini dikarenakan peningkatan logam berat pada tanah yang berlebihan sehingga bersifat toksik bagi mikroorganisme.

Tidak hanya mengganggu secara kimiawi, namun juga secara biologi yakni turunnya populasi mikroorganisme tanah, fungi dan aktinomiset. Kontaminasi logam berat dan kondisi pH yang buruk juga menyebabkan tidak memungkinkan mikroba pada tanah. Aktivitas enzim tanah seperti urease dan fosfatase pada tanah tambang emas dapat berkurang hingga 70 – 90% dibandingkan dengan tanah nrmal, hal ini mendeskripsikan disfungsi ekosistem yang terjadi pada tanah (Mendez & Maier, 2008).

Dengan peran pH sebagai pengontrol ketersediaan hara dan toksisitas logam, kadar pH tanah menjadi faktor dari keberhasilan pertumbuhan tanaman di lahan bekas tambang emas. Pada pH dibawah 4,5 maka konsentrasi logam berat pada tanah meningkat ke level fitotoksik, yang dapat menyebabkan terhambatnya pertumbuhan akar, penyerapan air pada tanaman, dan metabolisme tanaman secara keseluruhan (Kochian et al., 2004). Biomassa tanaman mulai dari akar hingga batang tanaman juga berhubungan dengan hal ini. pH pada kisaran 5,5 – 6,5 dapat meningkatkan produktifitas biomassa tanaman hiperakumulator, maka dari itu, pemulihan pH tanah menjadi langkah penting pada proses remediasi lahan tambang emas.

2.3 Logam Berat di Tambang Emas

Limbah yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan emas tradisional umumnya mengandung berbagai jenis logam berat seperti Merkuri (Hg), Sifatnya yang sulit terurai, bersifat toksik, dan dapat terakumulasi pada tanah serta makhluk hidup. Kumpulan logam berat yang terkandung dalam tanah pula dapat

menghambat pertumbuhan tanaman, dan melalui rantai makanan yang ada dapat berpotensi menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia (Tchonwou et al., 2012).

2.3.1 Merkuri (Hg)

Merkuri (Hg) tergolong logam berat yang terdapat dari berbagai sumber, baik yang bersifat alami maukupn antropogenik (buatan manusia). Sumber alaminya antara lain berasal dari penguapan laut dan letusan gunung berapi. Keberadaan Hg dalam tanah tidak bersifat tetap, melainkan dapat mengalami perpindahan dan pelepasan yang dipengaruhi oleh mobilitas atau perpindahannya, yakni senyawa – senyawa berbahaya pada tanah menuju aliran air tanag dan efeknya jika terjadi kontak dengan material biologi, sehingga mekanisme transportasi Hg dari tanah dapat mengakibatkan pencemaran lanjutan pada air tanah, udara, vegetasi hingga kesehatan manusia. Hg juga dapat mengalami transformasi kimiawi yang meningkatkan mobilitas serta sifat racunnya, hal ini dapat menimbulkan polusi lanjutan juga pada permukaan tanah, air tanah, bahkan hingga masuk pada rantai makanan (Aulia & Effendi, 2020).

Pada proses pertambangan emas, merkuri (Hg) digunakan untuk mengikat partikel emas sehingga membantu para pekerja untuk memisahkan emas dari bijinya (Siti Fatimah, et al 2023). Pada tanah dan air merkuri (Hg) dapat berubah menjadi metil merkuri yang bersifat toksik dan dapat dengan mudah terakumulasi dalam jaringan organisme. Pada hal ini merkuri (Hg) dapat menyebabkan gangguan pada sistem saraf, merusak ginjal, hingga ke sistem reproduksi manusia.

2.4 Nutrisi tanah dan tanaman

Kandungan nutrisi pada tanah dan tanaman menjadi salah satu faktor penting untuk produktivitas tanaman karena penyediaan unsur hara yang dibutuhkan. Ketersediaan unsur hara sangat dipengaruhi dari kondisi kimia, fisik dan biologi tanah, termasuk pH tanah, kandungan bahan organic, kapasitas tukar kation (KTK), dan aktivitas dari mikroorganisme. Salah satu unsur hara yang berkontribusi penting pada proses metabolisme tanaman, termasuk pada pembentukan ATP guna

sumber energi, sintesis RNA dan DNA, serta membantu pembentukan sistem akar yang kuat (Siti Fatimah, et al. 2023).

2.4.1 Fosfor (P)

Tanah bekas tambang emas rakyat, hasil menunjukkan jika kegiatan yang dilakukan dengan kondisi terbuka juga mengakibatkan hilangnya lapisan tanah bagian atas, hal ini mengakibatkan pH tanah menurun, KTK, N, P, dan K pada tanah memiliki kriteria rendah dan kandungan organik tanah juga sangat rendah. kandungan P yang rendah pada tanah juga ciri degradasi kesuburan tanah, yang secara langsung menghambat produktivias lahan dan mempersulit kegiatan revegetasi pemulihan lingkungan hijau di kawasan bekas tambang.

2.5 Remediasi Tanah

Remediasi tanah adalah proses pemulihan kualitas tanah yang terkontaminasi baik secara alami maupun karena aktivitas manusia agar dapat kembali pada kondisi tanah yang aman bagi lingkungan. Remediasi tanah dapat dilakukan dengan pendekatan fisik, kimia, dan biologis maupun kombinasi dari ketiganya (Vidali, 2016). Namun para peneliti semakin banyak mengembangkan pendekatan dengan biologis seperti bioremediasi dan fitoremediasi karena proses yang lebih ramah lingkungan.

2.5.1 Arang Sekam Padi

Sekam padi pada beberapa wilayah tidak dimanfaatkan lagi dan menjadi limbah pada sektor pertanian dari kegiatan pernggilingan padi, sehingga pengolahannya menjadi arang sekaligus berfungsi untuk strategi pengolaan limbah biomassa yang berkelanjutan (Muhajir et al., 2025). Arang sekam padi didapat dari proses pirolisis sekam padi, atau pemanasan biomassa pada suhu tinggi dengan kondisi minim atau tanpa oksigen, sehingga bahan organic terkonversi menjadi struktur karbon yang lebih stabil. Proses pirolisis yang terkontrol menghasilkan arang sekam padi dengan struktur pori yang berkembang baik dan stabilitas karbon yang tinggi, menyebabkan material ini dapat berpotensi besar sebagai adsorben dan penyedia hara bagi tanah (Muhajir et al., 2025).

2.5.2 Nano Biochar

Nano biochar yang digunakan adalah biochar dari sekam padi yang berukuran < 100 nm, dengan luas permukaan yang tinggi. Nano biochar dapat mengikat logam berat dengan proses pertukaran ion, kompleksasi permukaan, interaksi elektrostatik, dan presipitasi (Ramanayaka et al. 2020). Nano biochar dihasilkan dari proses pirolisis biomassa pada kondisi dengan oksigen terbatas yang nantinya menghasilkan partikel berukuran nano. Karakter struktur ini menyebabkan nano biochar mampu mengadsorpsi lebih dibandingkan dengan biochar pada umumnya, hal ini dapat dilihat dari grafik *X-Ray Diffraction* (XRD) pada hasil difraktogram di lampiran 4, yang menjelaskan adanya *hump* lebar pada rentang $2\theta \approx 15°–30°$ yang menunjukkan struktur karbon amorf, yang menandakan keberadaan fase mineral kristalin berbasis silica, seperti diantaranya kuarsa dan kristibalit, yang didapat dari residu proses karbonisasi sekam padi (Severo et al., 2020).

2.5.3 *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)

Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) adalah mikroorganisme yang masuk kedalam golongan filum *Glomeromycota* yang bersifat biotropik, atau dapat menyelesaikan siklus hidupnya melalui asosiasi simbiosis mutualistik dengan akar tanaman inangnya (Ali Pramono et al., 2012). Selain itu, AMF dikenal bersifat cosmopolitan karena mampu hidup di berbagai tipe ekosistem dan berimbolisis dengan hampir 90% spesies tanaman. Meski begitu, kepadatan populasi dan keragaman spesiesnya tidak selalu sama, sebab dipengaruhi oleh sejumlah faktor seperti suhu, pH, kelembapan, dan ketersediaan fosfor dan nitrogen. AMF bekerja dengan sistem simbiosis dimana akan menempel pada tanah dan akar sehingga akan membantu daya serap air dan unsur hara pada tanaman serta meningkatkan daya tumbuh tanaman.

AMF juga dapat memperbaiki kondisi fisik tanah dengan produksi glikoprotein glomalin oleh miselium ekstra matriks, yang mana berfungsi untuk pengikat jangka panjang yang akan menstabilkan mikroagregat tanah, meningkatkan hidrofobisitas, dan melindungi bahan organik yang ada dari

degradasi mikroba. Sehingga dengan cara kerja AMF yang membantu tanaman tetap hidup terutama pada lahan marginal menjadikan mikroorganisme ini sebagai salah satu media yang umum digunakan dalam aspek pertanian dan kehutanan (Arden, 2023). AMF memiliki struktur jaringan akar yang khas saat terbentuk di dalam akar, yakni arbuskula, dimana strukturnya menyerupai haustorium yang memiliki fungsi untuk perluasan zona penyerapan akar hingga 10 – 100% sehingga tanaman mampu menjangkau volume tanah yang jauh lebih luas dibandingkan kondisi tanaman tanpa adanya bantuan AMF (Abdelaaziz et al., 2025).

2.6 *Melaluca cajuputi*

Melaluca cajuputi masuk ke dalam golongan dari famili *Myrtaceae* yang berkemampuan tinggi dalam beradaptasi pada lingkungan yang ekstrim di sekitarnya. Tanaman ini dapat tumbuh pada tanah yang minim akan unsur hara dan lahan yang terdegradasi akibat dari aktivitas pertambangan. *Melaluca cajuputi* juga toleran terhadap kandungan toksisitas dari Zn dan Cd dengan nilai Faktor Transfer (TF) >1 dan Faktor Biokonsentrasi (BCF) <1, yang mana mengartikan kemampuannya untuk mentransfer logam ke bagian tajuk tanpa mengakumulasinya secara berlebihan dalam jaringan, sehingga logam dapat dipindahkan dari tang dengan pemanenan tajuk atau guguran daun dari tanaman *Melaluca cajuputi* (Usman et al., 2023).



Gambar 2.1 Tanaman *Melaluca cajuputi*

2.7 Penelitian Terdahulu

Penyusunan penelitian ini perlu adanya sejumlah acuan literature yang relevan sebagai landasan juga pendukung dari setiap tahapan yang dilakukan. Ringkasan dari beberapa hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik yang dibahas disajikan pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul	Hasil Penelitian
1	Prasetyo, et al., 2010	Rehabilitasi lahan bekas tambang emas dengan inokulasi mikoriza arbuskula pada semai Acacia mangium di media tailing	Inokulasi AMF meningkatkan kolonisasi akar hingga 34,6%, meningkatkan tinggi tanaman sekitar 25-35%, biomassa tanaman 30-45%, serta serapan fosfor lebih dari 40% dibandingkna kontrol tanpa inokulasi. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa AMF mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kondisi tailing yang mengandung logam berat
2	Ramanayak et al., 2020	Sintesis hijau nano biochar grafiti untuk penghilangan kontaminan organik dan anorganik dari media air dan tanah	Nano biochar grafik yang disintesis secara hijau menunjukkan kapasitas adsorpsi yang sangat tinggi terhadap kontaminan organik persisten dan logam berat dengan efisiensi adsorpso lebih dari 90% pada beberapa jenis polutan. Kapasitas adsorpsi meningkat 2-5 kali dibandingkan dengan biochar konvensional sehingga efektif menurunkan logam berat di tanah maupun air tercemar.
3	Putra et al., 2022	Peran AMF dalam fitoremediasi logam berat dan pertumbuhan pennisetum purpureum cv. Mott pada tailing tambang emas di Jambi, Indonesia	Inokulasi AMF sebanyak 10 gr/pot secara nyata meningkatkan 30% tinggi tanaman, 20-50% diameter batang, dan 40-50% bobot segar tanaman, serta secara signifikan menurunkan kadar logam berat Al, Co, Cr, dan Fe pada media tailing tambang emas sebanyak 20-45%, menjadikan AMF agen fitoremediasi yang efektif dan efisien.
4	Zheng et al., 2025	Peran nanokomposit berbasis biochar dalam remediasi	Nanokomposit biochar terbukti efektif mengimobilisasi logam berat sekitar 2-4 kali dibandingkan

		tanah: imobilisasi logam berat dan keamanan ekologis	dengan biochar biasa, dengan efisiensi imobilisasi logam berat mencapai 85-98% melalui pertukaran ion, dan kopresipitasi. Integrasi nanomaterial dengan biochar meningkatkan kapasitas adsorpsi secara substansial, namun potensi pelepasan nanopartikel ke tanah perlu diperhatikan demi keamanan ekologis jangka panjang.
5	Khan et al., 2025	Penggunaan biochar, kompos, dan amandemen organik kering dikombinasikan dengan mikoriza untuk mitigasi pencemaran logam berat di tanah	Perlakuan kombinasi biochar + AMF (T8) merupakan yang paling efektif, mampu menurunkan kadar Pb, Cd, dan Ni pada gabah hingga 93%, 76%, dan 83%, serta meningkatkan bobot kering pucuk dan akar masing – masing sebesar 66% dan 48%, mengindikasikan sinergi kuat antara biochar dan AMF dalam remediasi logam berat sekaligus meningkatkan produktivitas tanaman.

Berdasarkan hasil dari penelitian terdahulu menunjukkan bahwasanya AMF memberikan perkembangan yang efektif pada pertumbuhan tanaman. Namun hingga saat ini, masih belum banyak adanya penelitian yang menunjukkan hasil dari pengaruh dari pengaplikasian Nano biochar dengan AMF terhadap pertumbuhan tanaman *Melaleuca cajuputi* pada tanah bekas tambang emas yang mengandung beberapa logam berat. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam bentuk kumpulan data terbaru dan analisis mendalam mengenai peran Nano biochar dengan AMF dalam memperbaiki kualitas tanah terdegradasi akibat aktivitas pertambangan emas dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman *Melaleuca cajuputi*.

2.8 Hipotesis Penelitian

2.8.1 Hipotesis terhadap pH Tanah

Penggunaan kombinasi dari nano biochar (NB) dan AMF diduga dapat meningkatkan pH tanah bekas tambang dibandingkan dengan tanah tanpa perlakuan (S). Peningkatan nilai pH ini diduga karena sidat dari biochar yang cenderung basah (alkalin) akubat dari kandungan mineral dan senyawa

karbonat yang ada di dalamnya, sehingga mampu menetralkan keasaman pada tanah. Disamping itu juga, biochar juga diduga meningkatkan KTK tanah, yang memungkinkan tanah dapat menahan lebih banyak kation basa. Semakin lengkap kombinasi dari pembenah tanah yang digunakan, maka semakin besar pula perubahan pH yang diharapkan terjadi dibandingkan dengan perlakuan tanpa tambahan bahan pembenah.

2.8.2 Hipotesis terhadap kadar Merkuri (Hg) pada Tanah

Tanaman dengan penambahan NB dan AMF diduga dapat meningkatkan kadar Hg total pada tanah dibandingkan dengan tanaman kontrol, sebagai indikasi dari terjasinya proses imobilisasi Hg di dalam tanah. Peningkatan kadar Hg ini diduga terjadi karena gugus fungsi pada permukaan nano biochar, seperti gugus hidroksil dan karboksil, mampu mengikat ion Hg dari proses adsorpsi dan pembentukan kompleks logam-organik. Dengan terikatnya Hg pada partikel biochar, logam tersebut menjadi lebih stabil dan tidak mudah berpindah ke tanaman. Maka dari itu, peningkatan kadar Hg total di tanah pada perlakuan NB+AMF diduga bukan menunjukkan pencemaran yang bertambah, namun sebagai bukti bahwasanya Hg berhasil diimobilisasi.

2.8.3 Hipotesis terhadap kadar Merkuri (Hg) pada Jaringan Tanaman

Sejalan dengan dugaan pada kadar Hg pada tanah, maka penambahan NB+AMF diduga dapat menurunkan akumulasi Hg pada jaringan akar dan batang tanaman dibandingkan dengan tanaman kontrol (S). Penurunan ini diduga merupakan dampak dari kadar Hg yang berhasil diimobilisasi pada tanah oleh NB, sehingga jumlah Hg yang diserap oleh akar tanaman menjadi lebih sedikit, dan bergerak ke batang dengan kadar yang lebih sedikit. Disamping itu, AMF diduga berperan sebagai *biological barrier* yang membatasi translokasi logam berat dari akar menuju batang. Dengan demikian, penggunaan NB+AMF ini diharapkan mampu menurunkan resiko toksisistas Hg pada tanaman.

2.8.4 Hipotesis terhadap kadar P_2O_5 pada Tanah

Penambahan NB+AMF diduga dapat meningkatkan kandungan P_2O_5 dala tanah dibandingkan tanaman kontrol (S). Peningkatan ini diduga karena

AMF dapat memperluas penyerapan hara dengan terbentuknya jaringan hifa yang mampu menjangkau pori – pori tanah lebih jauh. Selain itu, perbaikan pH tanah akibat pemberian biochar turut berkontribusi terhadap peningkatan kelarutan fosfat, mengikat ketersediaan P sangat dipengaruhi oleh kondisi pH tanah. Kombinasi dari NB+AMF ini diduga menghasilkan peningkatan P_2O_5 yang lebih tinggi diabndingkan dengan tanaman dengan perlakuan (S).

2.8.5 Hipotesis terhadap kadar P_2O_5 pada Tanaman

Tanaman dengan tambahan bahan pembenah NB+AMF diduga dapat meningkatkan kadar P_2O_5 pada tanaman dibandingkan tanaman yang hanya sebgai kontrol. Peningkatan ini dapat diterjadi karena AMF berperan langsung dalam mentransfer fosfor yang diserap oleh hifa eksternal ke dalam sel akar dari struktur arbuskula, sehingga fosfor tidak hanya ada di tanah tapi benar – benar terserap ke tanaman. Dengan hal ini, maka semaki tinggi P_2O_5 di tanah yang diikuti oleh mekanisme transfer AMF yang optimal, maka semakin tinggi juga kadar P_2O_5 pada tanaman.

2.8.6 Hipotesis terhadap Pertumuhan dan Biomassa Tanaman

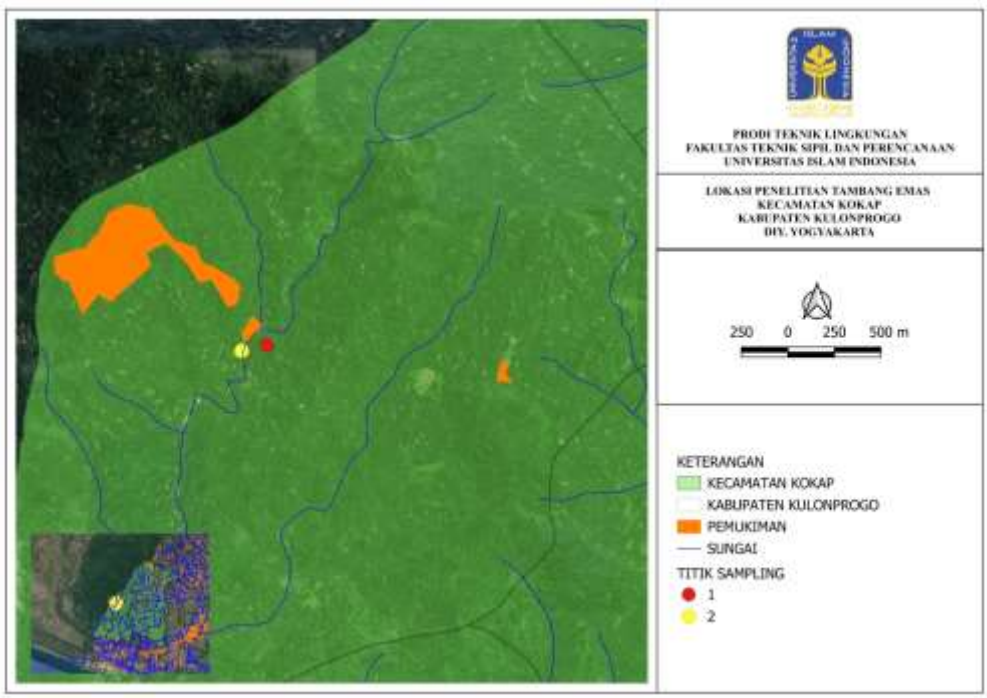
Peningkatan kadar P_2O_5 dan penurunan dari kadar Hg pada jaringan tanaman diduga berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan dan biomassa tanaman pada perlakuan S+NB+AMF dibandingkan dengan tanaman kontrol (S). Ketersediaan P_2O_5 yang tinggi diduga mendukung proses metabolism tanaman, termasuk pembentukan energi (ATP) dan perkembangan sistem perakaran. Di samping itu, rendahnya kadar Hg pada jaringan tanaman diduga mengurangi gangguan fisiologis akibat logam berat. Dengan hal ini, tanaman dengan perlakuan S+NB+AMF diharapkan dapat menghasilkan pertumbuhan serta biomassa tanaman yang lebih baik dibandingkan dengan tanaman kontrol (S).

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan, mulai dari persiapan media tanam, penanaman, pengamatan pertumbuhan, hingga pemanenan tanaman, yang seluruhnya dilakukan pada skala rumah kaca (green house) di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, tepatnya di koordinat 7°41'40.9"S 110°25'38.3"E.

Adapun media tanah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan tanah bekas kegiatan penambangan emas rakyat yang diambil dari Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pengambilan sampel dilakukan di dua titik lokasi, yaitu lokasi pertama pada koordinat 7°49'37.9"S 110°04'15.6"E dan lokasi kedua pada koordinat 7°49'38.9"S 110°04'11.2"E, keduanya berada di wilayah Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Selanjutnya, sampel tanah dianalisis di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.



Gambar 3.1 Lokasi Pengambilan Sampel

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat – alat yang digunakan pada penelitian ini tercantum pada tabel 3.1 Alat sebagai berikut :

Tabel 3.1 Alat

No	Nama Alat	Keterangan
1	Polybag 15x15	Untuk wadah bagi media tanaman
2	Caliper Digital	Untuk mengukur diameter batang
3	Meteran	Untuk mengukur tinggi tanaman
4	Autoclave	Untuk mensterilisasi alat laboratorium
5	Timbangan Analitik	Untuk menimbang berat basah dan kering tanaman uji
6	Timbangan Digital	Untuk menimbang bahan kimia yang digunakan
7	Oven	Untuk mengeringkan atau menghilangkan kadar air
8	Kaca Alroji	Untuk wadah menimbang sampel dan bahan
9	Corong kaca	Untuk meletakan kertas saring saat menyaring sampel hasil destruksi
10	Gelas Beaker 250 ml	Untuk wadah destruksi sampel
11	Erlenmeyer 250 ml	Untuk mencampur atau mewadahi larutan
12	Rak Tabung Reaksi	Untuk meletakkan tabung reaksi
13	Tabung Reaksi	Untuk mencampurkan dan menampungkan larutan sebelum diuji
14	Plastik Klip	Untuk wadah sampel setelah dihaluskan dan ditimbang
15	Amplop Coklat	Untuk wadah jaringan akar dan jaringan batang
16	ICP-MS	Untuk pembacaan parameter logam berat
17	UV-VIS	Untuk pembacaan parameter P

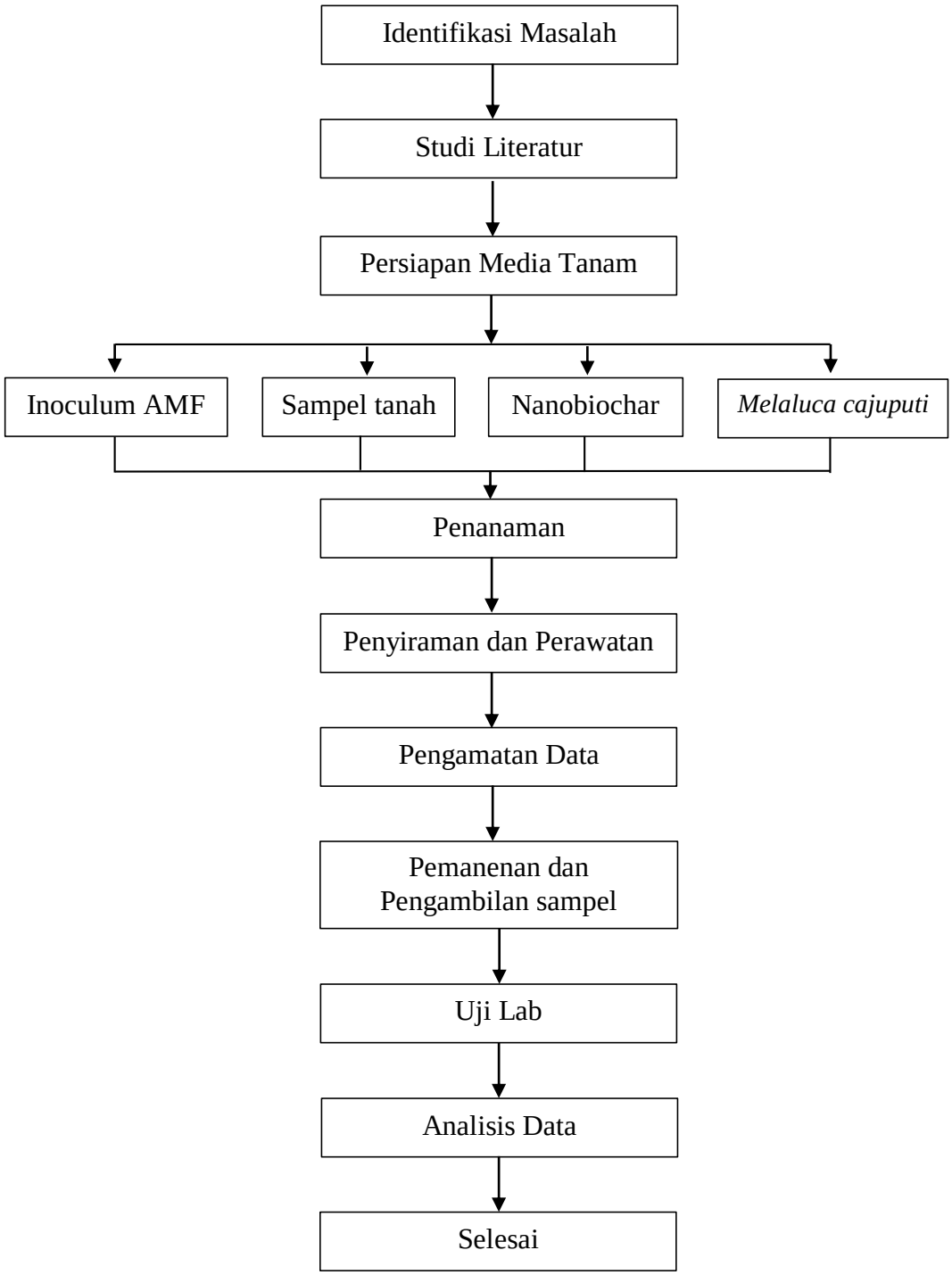
Adapun bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini tercantum pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Bahan

No	Nama Bahan	Kegunaan
1	*Melaluca cajuputi*	Sebagai vegetasi tanaman penguji
2	Tanah bekas tambang emas	Sebagai media tanaman uji
3	Arang sekam padi	Sebagai perbaikan struktur tanah
4	*Nano Biochar*	Sebagai detoksifikasi tanah
5	*Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)	Sebagai peningkatan penyerapan nutrisi
6	Kertas saring	Sebagai media penyaring larutan

3.3 Prosedur Analisis Data

Berikut adalah rangkaian tahapan penelitian yang dirangkum dalam bentuk *flowchart.*



Gambar 3.2 Prosedur Analisis Data

3.3.1 Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah diambil pada kedalaman 1-30 cm dengan menggunakan cangkul. Sampel tanah tidak diambil dari lapisan paling luar karena ditakutkan kandungan logam berat yang berkurang akibat erosi. Tanah yang diambil dimasukkan ke dalam karung dengan kapasitas 25kg.



Gambar 3.3 Pengambilan Sampel Tanah

3.3.2 Penambahan Nano biochar (NB)

Nano biochar yang digunakan adalah NB dari biocar sekam bakar dengan proses pirolisis pada kondisi oksigen terbatas. Penambahan NB ½ % sebanyak 12,5 gram untuk setiap reactor dengan tanah sebanyak 5kg. penambahan NB dilakukan dengan ditaburkan pada tanah bekas tambang, kemudian diaduk rata untuk pemerataan NB dengan tanah sehingga nanti dapat bekerja dengan maksimal.



Gambar 3.4 Penambahan Nanobiochar

3.3.3 Inokulasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)

Inokulum *Arbuscular Mychorrizal Fungi* (AMF) yang digunakan dengan dosis sebanyak 5g/polybag pada setiap perlakuan, AMF ditaburkan dengan merata pada sekitar akar tanaman saat proses penanaman dengan tujuan agar dapat terjadinya kontak langsung antara AMF dan akar tanaman. Kemudian AMF diharapkan dapat mengkolonisasi akar dengan optimal sehingga nantinya dapat meningkatkan daya serap unsur hara dan mendukung pertumbuhan tanaman.



Gambar 3.5 Inokulasi AMF

3.3.4 Persiapan Media Tanam

Kegiatan awal sebelum dilakukannya proses penanaman, terlebih dahulu dilakukan proses persiapan media tanam, tanah yang didapat dari lokasi pengambilan sampel langsung dilakukan proses sterilisasi dengan menggunakan metode kukus. Tanah bekas tambang, kompos, dan sekam padi dimasukkan kedalam wadah pengukus untuk disterilkan dengan suhu 85˚C selama 5 jam. Durasi lamanya proses sterilisasi ini diakibatkan karena tekstur tanah bekas tambang yang bersifat lempung, yang artinya memiliki pori-pori tanah yang kecil sehingga uap panah sulit untuk menembus bagian tanah secara merata. Serta karena banyaknya tanah yang disterilkan dalam satu kali proses sterilisasi membutuhkan waktu yang lebih lama agar panas merata (Tanaka et al., 2003). Proses sterilisasi tanah pula dilakukan dengan kondisi tanah yang dibungkus plastik dan tertutup rapat untuk meminimalisir kehilangan logam berat merkuri (Hg) melalui volatisitas mengingat sifat Hg yang sangat volatile dan mudah menguap seiring dengan bertambahnya suhu pemanasan (Kim et al., 2019).

Selanjutnya tanah yang awalnya padat akibat dari mengikuti bentuk wadah saat pengambilan sampel maka selanjutnya dihaluskan sehingga menghasikan butiran pasir yang tidak menggumpal, kemudian pasir yang telah halus di simpan pada sebuah wadah yang steril agar tidak terkontaminasi. Setelah proses tersebut, dilanjutkan dengan tahap *landfarming* atau metode pengolahan tanah menggunakan teknik bioremediasi *ex-situ* dengan menambahkan *Nano Biochar* (NB) ½% sebagai media untuk mempercepat pemulihan tanah. *Landfarming* dilakukan menggunakan 2 reaktor, dengan kode (S) untuk *soil*, dan (S+NB) untuk *soil + Nano Biochar*, dengan masing – masing reaktor diperlukan tanah sebanyak 5kg, dan penambahan NB ½ % sebanyak 12,5 gram. *Landfarming* dilakukan selama 8 minggu, dengan tetap dilakukan pemantauan kadar air pada setiap reaktor.



Gambar 3.6 Landfarming Tanah Bekas Tambang

3.3.5 Penanaman

Penanaman dilakukan menggunakan tanaman kayu putih (*Melaluca cajuputi)*, serta proses penanaman dilakukan di pagi hari. penanaman dilakukan dengan menggunakan polybag ukuran 15 x 15 dengan jumlah ulangan tanaman setiap kode perlakuan sebanyak 4 pengulangan. Berikut merupakan daftar kode perlakuan yang digunakan saat menganalisis data penelitian :

Tabel 3.3 Kode perlakuan tanaman

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

Penambahan arang sekam padi sebanyak 25gr/polybag mampu memperbaiki sifat fisik tanah dari peningkatan porositas, aerasi, kapasitas menahan air dan kandungan bahan organic tanpa mengubah struktur tanah secara berlebihan (Gani, A, 2009). Dosis Nano biochar yang digunakan sebanyak ½% ini berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penambahan nano biochar pada rentang 0,25 – 1% mampu meningkatkan kapasitas dari adsorpsi logam berat, meningkatkan ketersediaan unsur hara dan memperbaiki kapasitas tukar kation tanah (Ramanayaka et al., 2020). Penambahan AMF sebanyak 25gr/polybag karena dosis terterbut telah banyak digunakan pada penelitian skala rumah kaca dan mampu menghasilkan kolonisasi akar yang efektif, sehingga mampu meningkatkan penyerapan fosfor, memperbaiki toleransi tanaman terhadap kontak dengan logam berat dan meningkatkan pertumbuhan biomassa tanaman tanpa menyebabkan kompetisi antrarfungsi di perakaran (smith, 2008).



Gambar 3.7 Proses penanaman

3.3.6 Penyiraman dan Perawatan

Kegiatan penyiraman dilakukan setiap sore pukul 16.00 WIB. Dengan perawatan yang dilakukan yakni penyem ptotan fungisida pada tanaman yang menunjukkan gejala terinfeksi dengan tanda adanya bercak putih pada daun serta mencabut rumput liar yang tumbuh di dalam polybag.



Gambar 3.8 Penyemprotan Fungisida dan Penyiraman Tanaman

3.3.7 Pengambilan Data Pertumbuhan

Proses pengambilan data pertumbuhan dilakukan setiap 2 minggu sekali dengan mengukur tinggi tanaman, diameter tanaman, serta jumlah tanaman yang hidup dan mati. Pengukuran diameter batang tanaman dilakukan dengan jarak 1cm dari permukaan tanah. Hal ini untuk menganalisis pengaruh perlakuan pembenahan tanah terhadap pertumbuhan tanaman. Untuk pengukuran tinggi tanaman diukur dari batang leher hingga batang bagian atas.



Gambar 3.9 Pengukuran Diameter Batang dan Tinggi Tanaman

3.3.8 Pemanenan

Pemanenan dilakukan pada usia tanaman 4 bulan, dan pengambilan sampel dilakukan dengan memisahkan antara jaringan atas dan jaringan akar. Selanjutnya dilakukan pengukuran biomassa basah dan kering tanaman. Pengukuran biomassa basah tanaman ditimbang dengan timbangan analitik, kemudian jaringan atas dan jaringan akar masing – masing di simpan pada amplop coklat sebagai adah steril dan diberi nama sesuai kode perlakuan masing – masing. Untuk sampel tanah dari setiap perlakuan juga diambil

sebanyal 200 gr dan dimasukkan kedalam plastik *zip lock* sebagai wadah steril agar udara tidak masuk dan diberi kode sesuai perlakuan.

Pengukuran biomassa kering untuk tanaman dilakukan dengan mengoven jaringan tanaman dengan suhu 50˚ selama 3 hari (72 jam), kemudian setiap jaringan tanaman ditimbang dengan timbangan analitik untuk mendapatkan berat kering.



Gambar 3.10 Pemanenan tanaman

Pada gambar 3.10 adalah hasil panen untuk tanaman dengan urutan dari paling kiri, tengah, hingga kanan adalah tanaman dengan perlakuan S, S+NB, dan S+NB+M. dari gambar ini dapat dilihat banyakan akar dan tinggi tanaman saat proses penamenan.

3.3.7 Uji Lab

Uji lab dilakukan untuk menguji parameter logam berat Hg pada tanah, batang dan akar tanaman. Dan parameter nutrisi yang diuji adalah P_2O_5 untuk tanah, batang dan akar tanaman. Uji lab ini dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia dengan menggunakan alat *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)* untuk uji Hg, dan UV-VIS untuk menguji parameter P_2O_5.



Gambar 3.11 Pengujian sampel

3.3.9 Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan statistika analisis yaitu dengan pendekatan error antar perlakuan. Yang nantinya akan dilakukan pengujian pada kadar logam berat (Hg) dan kandungan nutrisi (P_2O_5) pada tanah, batang serta akar tanaman. Hasil pengujian kemudian ditampilkan dengan bentuk diagram dan grafik, agar mengetahui potensi dari Nano Biochar dan AMF sebagai bahan bantu perbaikan kualitas tanah bekas tambang emas.

3.3.8.1 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 / *ICP-OES* (mg/L)

V = volume akhir setelah proses destruksi (Ml)

W = berat contoh uji (gr)

Fp = faktor pengenceran

P = fraksi padat

3.3.8.2 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 P potensial (mg P_2O_5 100 g^{-1}). Perhitungan pengolahan data menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P_2O_5 \text{ (mg } P_2O_5 \text{ 100 } g^{-1}) = \text{ppm kurva} \times (\text{ml ekstrak}/1.000) \times 1.000\text{g (g contoh)}^{-1} \text{ x } fp \times 142/190 \times fk$$

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

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 I untuk mengetahui kandungan P_2O_5 teredia (ppm) Perhitungan pengolahan data menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P_2O_5 \text{ teredia (ppm)} = \text{ppm kurva} \times \text{ml ekstrak}/1.000 \times 1.000\text{g (g contoh)}^{-1} \text{ x } fp \times 142/190 \times fk$$

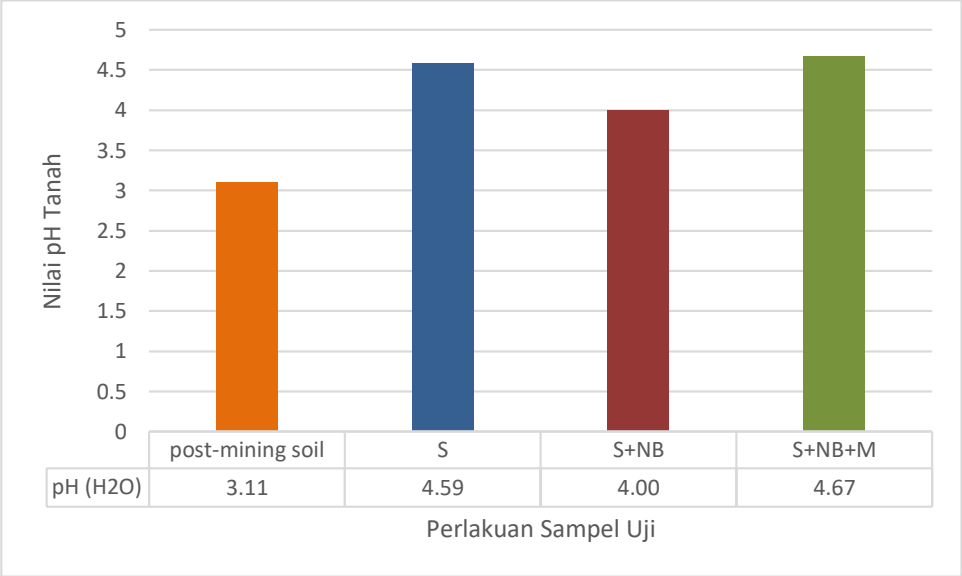
keterangan :

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 Hasil Pengujian pH Tanah

Pengujian dan analisis nilai pH tanah juga dilakukan pada setiap tanah sampel uji untuk mengetahui derajat keasaman yang didapat (pH). Sebanyak 200gr dari setiap sampel tanah dimasukkan kedalam plastik *ziplock* dan dinamai sesuai kodenya masing – masing, kemudian pengujian dilakukan di Laboratorium Penguji Balai Penerapan Modernisasi Pertanian D.I. Yogyakarta. Berikut grafik dari nilai pH pada tanah :



Gambar 4.1 Kadar pH pada tanah polybag

Berdasarkan dari nilai grafik pada gambar 4.1, didapatkan hasil nilai pH untuk tanah *post mining* yakni 3,11, tanah dengan kode S yakni 4,59, sedangkan untuk tanah dengan kode S+NB didapat nilai pH 4, dan tanah dengan kode S+NB+M memiliki nilai pH 4,67. Dari nilai yang didapat, untuk tanah S dan S+NB+M tergolong masam, dan tanah perlakuan S+NB tergolong sangat masam, hal ini sesuai dengan penilaian pH, yang dikatakan sangat asam jika nilai pH <4,5, asam jika ada di rentang 4,5 – 5,5, agak masam pada nilai 5,6 – 6,5, dan netral pada nilai pH 6,6 – 7,5 (Distanpangan Bali, 2023).

Penambahan biochar pada tanah dapat meningkatkan nilai pH tanah secara alami dengan berperan sebagai agen pengapuran tanah. Pada tanah dengan pH awal

yang rendah, penambahan biochar secara signifikan dapat meningkatkan pH tanah (Zhang et al., 2025). Hal ini menjelaskan perlakuan tanah dengan perlakuan S yang hanya mengandung sekam padi dapat menaikkan pH dari sangat asam menjadi asam. Namun pada tanah dengan perlakuan S+NB memiliki nilai pH yang lebih rendah dari tanah dengan perlakuan S. Dimana karena faktor luas permukaan spesifik dan kapasitas tukar kation (KTK) nanobiochar umumnya dapat meningkatkan pH tanah lebih tinggi dibandingkan dengan biochar biasa (Tandfonline, 2026). Namun, peningkatan densitas gugus asam pada proses pembuatan nanobiochar berpotensi untuk menutupi efek pengapuran dari abu alkali pada dosis pengaplikasian tertentu, sehingga pH tanah tidak dapat meningkat begitu saja sebagaimana pada tanah dengan perlakuan S.

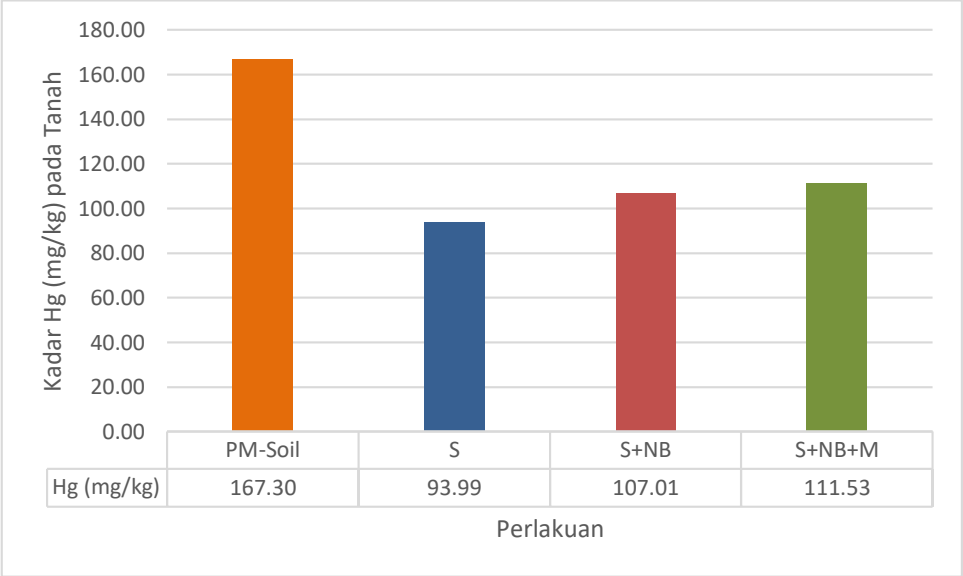
Peningkatan pH pada tanah dengan perlakuan S+NB+M mencapai nilai 4,67. Nilai ini juga membuktikan bahwa hasil yang didapat sesuai dengan hipotesis yang ada pada pembahasan sub bab 2.8.1, dimana sejalan dengan peran fungsi AMF yang dapat memperbaiki kondisi kimia pada tanah yeng tercemar logam berat, dimana AMF pada akar tanaman dapat meningkatkan serapan nilai unsur hara (P dan N), merangsang produksi glomalin yang berperan dalam bertujuan untuk pengikatan logam berat dan perbaikan tanah (Wang et al., 2022). Sehingga semakin lengkap kombinasi bahan pembenah tanah yang digunakan, maka semakun besar pula peningkatana pH yang terjadi, sejalan dengan dugaan bahwa kombinasi S+NB+M bersifat sinergis.

4.2 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Logam Merkuri (Hg)

Salah satu kandungan logam berat yakni merkuri (Hg) tergolong kandungan logam non-potensial yang beracun dan tidak dapat terdegradasi oleh lingkungan. Pengukuran kadar kandungan Hg diujikan pada tanah polybag, batang dan akar tanaman untuk mengetahui pergerakan atau aliran kandungan Hg pada tanaman dengan setiap perlakuan tanaman yang berbeda.

4.2.1 Reduksi Logam Merkuri (Hg) pada Tanah Polybag

Berikut merupakan hasil dari pengujian logam berat Hg pada tanah polybag :



Gambar 4.2 Kadar Hg pada Tanah Polybag

Berdasarkan grafik pada gambar 4.2 didapatkan hasil pengujian kadar Hg pada tanah *post mining* yakni 167,30 mg/kg dengan kode S untuk kontrol sebanyak 93.99 mg/kg, pada tanaman dengan kode perlakuan S+NB didapatkan sebanyak 107,01 mg/kg, dan tanaman dengan perlakuan S+NB+M didapatkan kandungan Hg sebanyak 111,53 mg/kg.

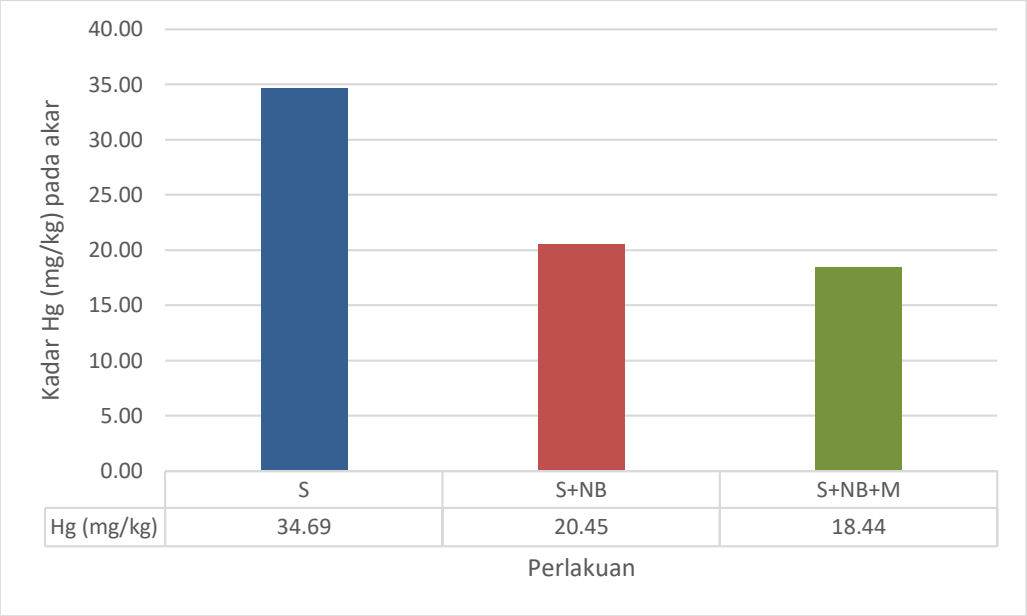
Dari grafik dapat terlihat semakin banyak kandungan bahan pembenah yang ditambahkan, maka semakin banyak pula kandungan Hg yang tertahan, hal ini mengacu pada mekanisme retensi, dimana merkuri yang pada kontrol berpotensi hilang melalui volatilisasi Hg, atau terangkut ke jaringan tanaman, sedangkan pada perlakuan dengan pembenah, tertahan di tanah dalam bentuk yang tidak mudah bergerak.

Disamping dari menahan Hg di dalam tanah, penurunan kadar Hg pada setiap perlakuan menunjukan adanya perubahan bentuk merkuri menjadi fraksi yang lebih stabil dan kurang tersedia bagi tanaman. Biochar juga memiliki luas permukaan yang besar dan kadar tukar kation yang tinggi sehingga dapat mengadsorpsi ion logam dan menurunkan mobilitas Hg didalam tanah. Sedangkan AMF berperan untuk memperluas area serapan akar, dan

meningkatkan stabilitas tanah (Ibramin, et al., 2023). Sehingga penggabungan antara NB+AMF ini mengakibatkan logam berat termobilisasi pada tanah dan menghambat pergerakan logam berat berpindah kejaringan tanaman. Temuan ini memperkuat dugaan awal bahwasanya peningkatan Hg pada tanah merupakan indicator keberhasilan dari proses imobilisasi, bukan indikator dari kegagalan proses remediasi tanah.

4.2.2 Reduksi Logam Merkuri (Hg) pada Tanaman

Berikut merupakan hasil dari pengujian logam berat Hg pada akar tanaman :



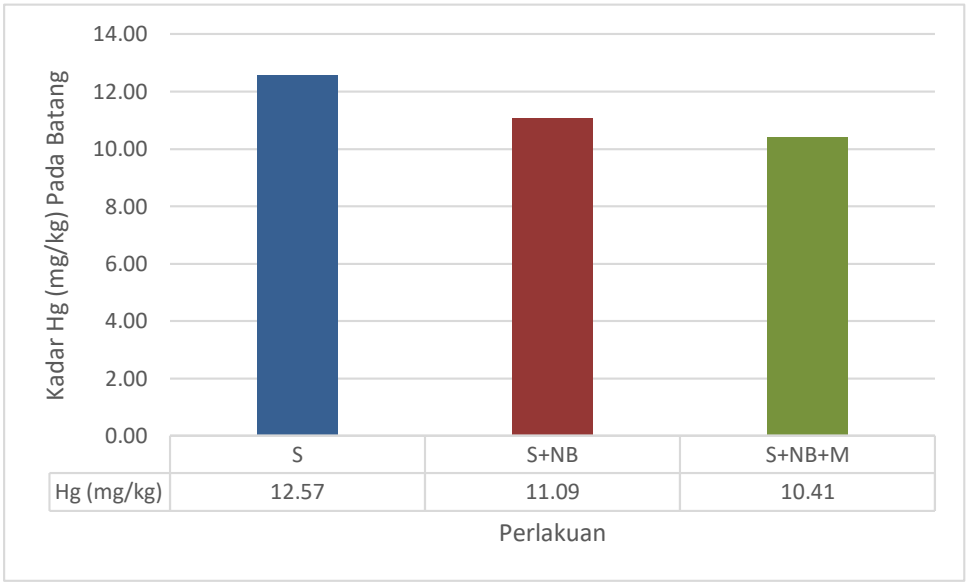
Gambar 4.3 Kadar Hg pada Akar

Berdasarkan grafik dari gambar 4.3, penurunan kdar Hg paling signifikan terjadi pada jaringan akar. Pada tanaman dengan kode S sebagai kontrol didapatkan kadar Hg sebanyak 34,69 mg/kg. Pada akar tanaman dengan kode perlakuan S+NB didapatkan hasil sebanyak 20,45 mg/kg. dan pada akar tanaman dengan kode perlakuan S+NB+M didapatkan hasil kandungan Hg pada akar sebanyak 18,44 mg/kg.

Akar merupakan organ yang bersentuhan langsung dengan larutan tanah sehingga menjadi kompartemen yang paling sensitif terhadap perubahan ketersediaan hayati logam. Besarnya penurunan pada akar dibandingkan pada batang menunjukkan bahwa titik intervensi utama bahan pembenah tanah

terjadi pada antarmuka tanah–akar, yaitu pada tahap sebelum Hg memasuki sistem tanaman. AMF menerapkan strategi ganda, yaitu pengikatan logam pada permukaan dinding sel fungi serta kompartementasi logam di dalam vakuola dan spora, sehingga logam tertahan pada jaringan fungi dan akar sehingga tidak diteruskan ke batang tanaman (Ferrol et al., 2016). Selain itu, glomalin turut menstabilkan mikroagregat tanah dan meningkatkan hidrofobisitas agregat (Rillig, 2004), yang secara tidak langsung mengurangi kontak antara larutan tanah pembawa merkuri dengan permukaan akar.

Berikut merupakan hasil dari pengujian logam berat Hg pada batang tanaman :



Gambar 4.4 Kadar Hg pada Batang

Berdasarkan grafik pada gambar 4.4 didapatkan hasil perbandingan dari kadar Hg pada batang tanaman. Batang tanaman dengan perlakuan S sebagai kontrol memiliki kadar Hg sebanyak 12,57 mg/kg. Sedangkan tanaman dengan perlakuan S+NB memiliki kandungan Hg pada batang sebanyak 11,09 mg/kg. dan pada batang tanaman dengan perlakuan S+NB+M didapatkan kandungan Hg sebanyak 10.41 mg/kg. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NB + AMF dapat menurunkan Hg pada jaringan batang tanaman.

Penurunan kadar Hg pada batang tanaman disebabkan karna tambahan bahan pembenah tanah yang digunakan. NB memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur berpori, dan gugus fungsi aktif yang dapat mengadsorpsi

Hg pada tanah, hal tersebut menyebabkan mobilisasi Hg menurun sehingga kadar Hg pada batang semakin kecil. Kecilnya kadar Hg pada jaringan batang dengan perlakuan S+NB+M menunjukan bahwa AMF berperan lebih dalam menekan kadar Hg pada batang tanaman. Jaringan AMF mampu mengikat logam berat pada dinding selnya, sedangkan glikoprotein glomalin yang dihasilkan AMF mengadsorpsi logam berat di area perakaran. Sehingga kadar Hg tetap berada di area akar dan kadar Hg yang diteruskan ke batang lebih sedikit. Hal ini konsisten dengan dugaan bahwasanya terjadi proses bioavailibilitas Hg akibat proses imobilisasi di tanah yang menyebabkan lebih sedikitnya Hg yang terserap oleh tanaman, juga menguatkan keterkaitan antara imobilisasi Hg pada tanah dengan menurunnya Hg pada tanaman.

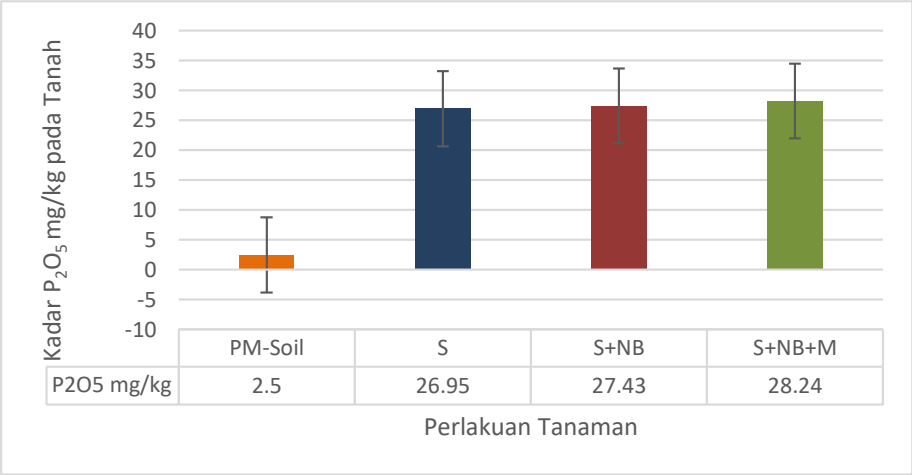
4.3 Pengaruh Bahan Pembenah Tanah Terhadap Nutrisi P_2O_5

Terdapat beberapa hal yang mempengaruhi proses kestabilan tanah, salah satu diantaranya adalah ketersedian nutrisi pada tanah untuk pertumbuhan tanaman. Kandungan nutrisi pada tanah bekas tambang pada umumnya sangat kurang sehingga tidak cukup untuk pembenahan tanah, maka dari itu sebagai upaya untuk meningkatkan hal tersebut diperlukannya nutrisi yang dapat mendukung pertumbuhan tanaman.

Fosfor merupakan unsur hara makro yang berperan langsung dalam pembentukan ATP sebagai sumber energi metabolisme, sintesis asam nukleat, pembentukan fosfolipid membran, serta perkembangan sistem perakaran. pengupasan lapisan tanah atas menghilangkan cadangan bahan organik, oksidasi mineral sulfida menurunkan pH tanah, dan populasi mikroorganisme pelarut fosfat menurun drastis menjadi faktor pembatas utama fosfor pada tanah bekas tambang emas.

4.3.1 Peningkatan Kandungan P_2O_5 pada Tanah Polybag

Berikut merupakan hasil dari pengujian kandungan P_2O_5 pada tanah polybag dengan metode Bray I:



Gambar 4.5 Kadar P2O5 pada Tanah Polybag

Tabel 4.1 Tabel Kategori Kadar P_2O_5 (mg/kg) pada Tanah

No	Kategori	Kadar P_2O_5 (mg/kg)
1	Sangat rendah	<10 mg/kg
2	Rendah	10 – 15 mg/kg
3	Sedang	16 – 25 mg/kg
4	Tinggi	26 – 35 mg/kg
5	Sangat tinggi	> 35 mg/kg

Sumber : Pusat Penelitian Tanah (1983)

Berdasarkan grafik pada gambar 4.5 dan dibandingkan dengan tabel 4.1 didapatkan hasil pengujian dari parameter P_2O_5 pada setiap perlakuan yang berbada. Pada tanah *post mining soil* memiliki kadar P_2O_5 sebanyak 2,5 mg/kg dengan kategori sangat rendah. pada tanah polybag dengan perlakuan S sebagai kontrol didapatkan konsentrasi kadar P_2O_5 sebanyak 26,95 mg/kg dengan kategori sangat tinggi, sedangkan pada tanah dengan kode S+NB didapatkan kadar P_2O_5 sebanyak 27,43 mg/kg dengan kategori sangat tinggi dan pada tanah dengan kode S+NB+M didapatkan kadar kandungan P_2O_5 sebanyak 28,24 mg/kg dengan kategori sangat tinggi pula. hal ini menunjukkan bahwa penambahan AMF pada tanah dapat meningkatkan kadar fosfor pada tanah.

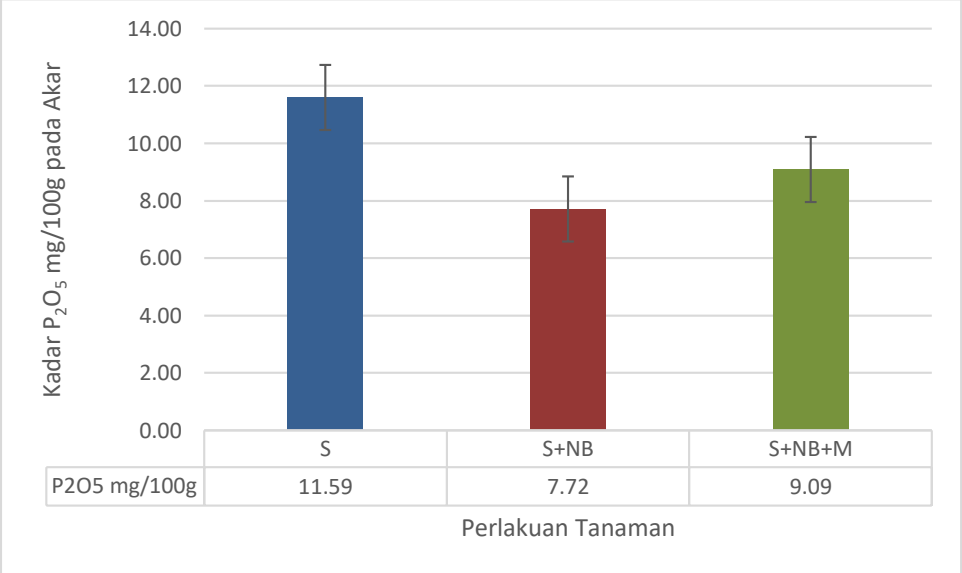
Tingginya kadar P tersedia pada seluruh perlakuan, termasuk kontrol (S), disebabkan oleh penambahan arang sekam padi pada seluruh media tanam sebagai media dasar. *Biochar* meningkatkan pH tanah masam karena

mengandung kation basa dalam jumlah besar yang menggantikan H+ pada kompleks pertukaran (Chen et al., 2023). Selain itu, permukaan biochar yang bermuatan mampu menahan ion fosfat, sementara pori-porinya menyediakan tempat bagi mikroorganisme pelarut fosfat (Lehmann et al., 2015). Pda perlakuan S+NB kadar P meningkat disebabkan dari kemampuan NB yang dapat memperbaiki sifat kimia tanah, dimana mempunyai kemampuan KTK yang tinggi sehingga mampu mengurangi fiksasi fosfat oleh Fe dan Al pada tanah masam. (Zhang et al., 2025).

Sehingga peningkatan P_2O_5 seiring dengan perlakuan bahan pembenah pada tanaman ini terbukti sesuai dengan hipotesis, dimana peningkatan ini sejalan dengan dugaan bahwa AMF memperluas jangkauan penyerapan hara melalui jaringan hifa eksternal, disamping itu berbaikan pH tanah akibat dari penambahan biochar juga mengfaktori naiknya kadar P_2O_5 pada tanah. Kombinasi NB+AMF dapat meningkatkan akses tanaman terhadap nutrisi P dibandingkan hanya penggunaan NB saja (Vanek, S.J et al., 2015).

4.3.2 Peningkatan Kandungan P_2O_5 pada Tanaman

Berikut grafik perbandingan kandungan P_2O_5 pada jaringan akar pada setiap perlakuan tanaman dengan metode HCL 25% :

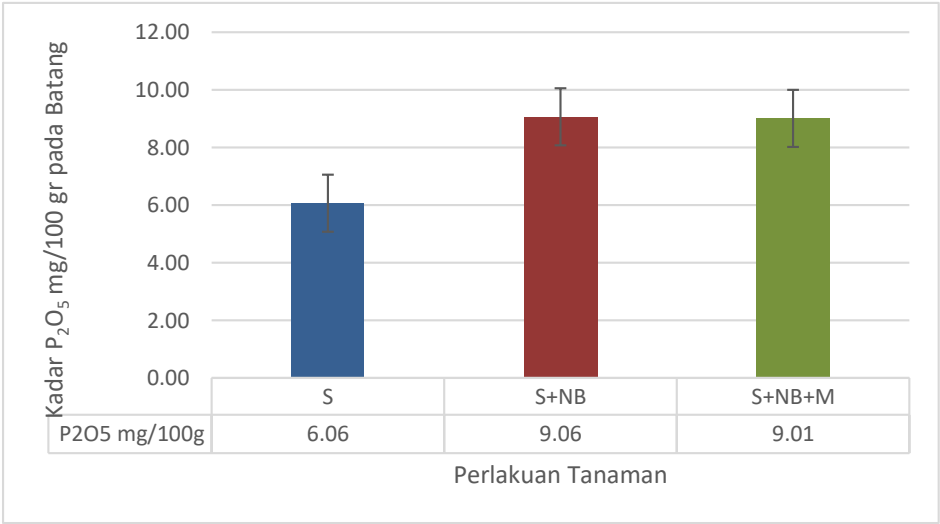


Gambar 4.6 Kadar P_2O_5 pada Akar

Berdasarkan grafik pada gambar 4.6 didapatkan perbandingan kadi kadar kandungan P_2O_5 pada akar tanaman sesuai dengan maisng – masing perlakuan bahan pembenah tanah. Pada tanaman dengan kode S atau sebagai kontrol, didapatkan kadar P_2O_5 pada akar tanaman sebanyak 11,59 mg/100gr. Pada akar tanaman dengan kode perlakuan S+NB di dapatkan kadar P_2O_5 sebanyak 7,72 mg/100gr. dan pada akar perlakuan tanaman dengan kode S+NB+M didapatkan kadar kandungan P_2O_5 pada akar tanaman sebanyak 9,09 mg/100gr.

Tingginya kadar P_2O_5 pada akar dengan perlakuan tanaman S atau kontrol tidak selalu menunjukkan penyerapan P_2O_5 yang baik. Dengan kondisi tanah yang tercemar logam berat, fungsi fisiologi akar dapat terganggu dan menghambat aktivitas mobilisasi P_2O_5 ke batang tanaman, menyeabkan P_2O_5 tertahan pada akar (Marschner, 2012). Sedangkan pada tanaman dengan perlakuan S+NB dan S+NB+M, NB berperan menurunkan kadar Hg melalui proses adsorpsi sehingga cekaman Hg lebih rendah dan AMF dapat memperluas daerah serapan akar sehingga meningkatkan penyerapan dan mobilitas P_2O_5 pada tanah ke jaringan batang tanaman (Smith & Read, 2008).

Berikut grafik perbandingan kandungan P_2O_5 pada jaringan batang terhadap setiap perlakuan tanaman dengan metode HCL 25% :



Gambar 4.7 Kadar P_2O_5 pada Batang

Berdasarkan gambar 4.7 didapatkan grafik perbandingan dari kadar kandungan P_2O_5 pada akar. Pada perlakuan tanaman dengan kode S atau control didapatkan kadar P_2O_5 sebanyak 6.06 mg/100gr, pada tanaman dengan

kode perlakuan S+NB didapatkan kandungan P_2O_5 sebanyak 9,06 mg/100gr, dan pada tanaman dengan kode perlakuan S+NB+M didapatkan kandungan P_2O_5 sebanyak 9,01 mg/100gr. Berbanding terbalik dengan grafik pada gambar 4.6 tentang kadar P_2O_5 pada akar, P_2O_5 pada batang memiliki hasil yang berbeda, hal tersebut menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan distribusi fosfor dari akar menuju bagian batang tanaman.

Dari penggunaan bahan pembenah tanah S+NB+M didapatkan nilai paling tinggi diabndingkan dengan bahan pembenah tanah lainnya. Ketidaksebandingan kadar P pada akar dan batang merupakan indikasi kuat bahwa yang meningkat bukan sekadar ketersediaan fosfor di tanah, melainkan efisiensi penyerapan dan pengangkutan fosfor oleh tanaman. Dimana bahan pembenah tanah bekerja terutama dengan memperbaiki kemampuan tanaman mengakses fosfor.

Pada banyak sistem simbiosis, jalur serapan fosfor melalui AMF dapat mendominasi total serapan fosfor tanaman bahkan ketika respons pertumbuhan yang teramati kecil (Smith et al., 2008). Hal ini pula sejalan dengan data yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa perlakuan S+NB+M menunjukkan kadar Hg pada batang dan akar yang mengalami penurunan, dan menghasilkan kadar P_2O_5 batang yang tinggi. Sehingga menjelaskan bahwa turunnya kadar Hg diakibatkan dari penambahan bahan pembenah (NB+M) yang menyebabkan proses serapan P_2O_5 pada tanaman menjadi lebih baik dan mendukung pertumbuhan tanaman. Hal ini memperkuat dugaan bahwa struktur AMF berfungsi dengan efektif sebgaia jalur transfer hara dai tanah ke akar tanaman.

4.4 Pengaruh Pembenah Tanah Terhadap Pertumbuhan Tanaman

Untuk mengetahui pengaruh bahan pembenah tanah terhadap tanaman uji perlu dilakukannya pengamatan pada aspek biomassa tanaman, tinggi dan diameter tanaman untuk menilai efektivitas dari penggunaan bahan pembenah tanah pada tanah bekas tambang emas. Indikator ini dipilih karena saling berkesinambungan, dari tinggi tanaman yang menunjukkan respon terhadap ketersediaan hara dan cahaya, diameter batang menunjukkan pertumbuhan yang menunjukkan kumpulan fotosintat jangka panjang, sedangkan biomassa tanaman merupakan rangkuman

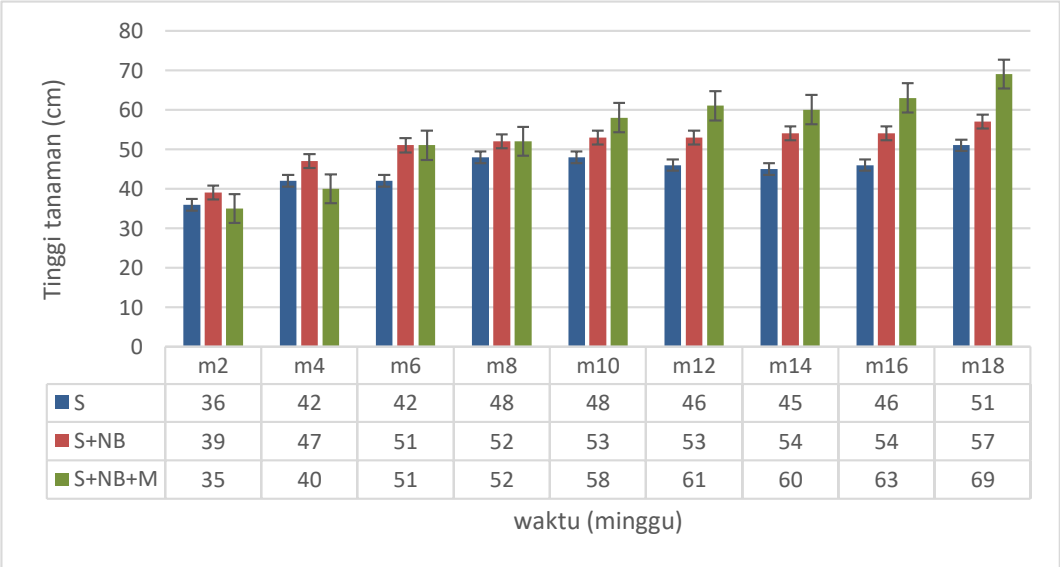
dari seluruh hasil fotosintesis tanaman selama masa tanam. Pengamatan tinggi dan diameter tanaman ini dilakukan setiap dua minggu selama 4 bulan dan biomassa diukur 1 kali pada saat pemanenan.

4.4.1 Tinggi Tanaman

Pengukuran tinggi tanaman dilakukan setiap 2 minggu untuk dapat melihat pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan. Berikut gambar dan hasil grafik dari perbandingan pertumbuhan tinggi tanaman selama 4 bulan penanaman.:



Gambar 4.8 Perbandingan Tinggi Tanaman



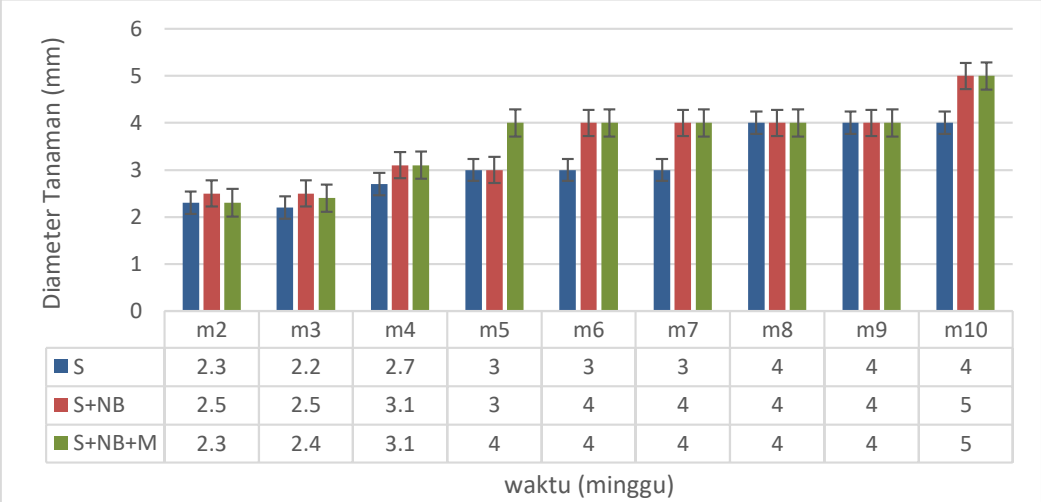
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Tinggi Tanaman

Berdasarkan dengan grafik pada gambar 4.9 diagram menunjukkan gambaran perbandigan tiga perlakuan pertumbuhan tanaman (S, S+NB, S+NB+M) selama 18 minggu. Pada minggu ke-2, tanaman dengan perlakuan S+NB+M justru memiliki tinggi paling rendah (35 cm) dibandingkan dengan S (36 cm) dan S+NB (39 cm) , namun pertumbuhannya meningkat pesat seiring berjalannya waktu hingga mencapai 69 cm pada minggu ke-18, melebihi perlakuan S+NB (57cm) dan S (51cm). pola pertumbuhan yang lambat di awal namun meningkat pesat pada minggu-minggu selanjutnya ini sejalan dengan sifat AMF yang memerlukan waktu untuk membentuk kolonisasi akar secara optimal sebelum manfatanya terhadap pertumbuhan tanaman terlihat dengan signifikan (Prasetyo et al., 2010). Perbaikan sifat fisik tanah oleh sekam padi dan nano biochar juga memberikan dampak positif dalam menyediakan ketersediaan air dan aerasi akar dalam waktu yang lama, sehingga hal ini mempengaruhi pertumbuhan tinggi tanaman.

Merkuri (Hg) diketahui menghambat pertumbuhan melalui pengikatan pada gugus sulfhidril(–SH) enzim, gangguan pada rantai transpor elektron fotosintesis, serta pemicuan pembentukan *reactive oxygen species* yang merusak membran sel. Fenomena penurunan tinggi pada tanaman kontrol (S) umumnya disebabkan oleh kematian ujung pucuk (*dieback*) atau kelayuan tunas terminal akibat cekaman, yang menyebabkan titik pengukuran tertinggi bergeser ke bawah. Pola ini merupakan gejala klasik cekaman logam berat yang berlangsung kronis. Sehingga tanaman dengan kode S atau kontrol pertumbuhan tinggi tanamannya tidak terlalu sama dengan hasil dari perlakuan tanaman lain dikarenakan selaras dengan kandungan Hg pada batang tanaman yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman lainnya. Pada hasil dari pertumbuhan di minggu ke 8 – minggu ke 10 masih dalam kadar normal secara biologis jika dikaitkan dengan waktu yang dibutuhkan dari mikoriza untuk terbentuk, dimana AMF pada akar tanaman berkayu umumnya memerlukan waktu enam hingga sepuluh minggu sebelum jaringan hifa ekstraradikal cukup berkembang untuk memberikan kontribusi nyata terhadap serapan hara (Smith & Read, 2008).

4.4.2 Diameter Tanaman

Pengukuran dan perbandingan nilai diameter batang tanaman diperlukan untuk mengetahui daya serap batang tanaman sesuai dengan pemberian bahan pembenah tanah pada masing – masing tanaman. Berikut grafik data perbandingan diameter batang tanaman :



	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10
S	2.3	2.2	2.7	3	3	3	4	4	4
S+NB	2.5	2.5	3.1	3	4	4	4	4	5
S+NB+M	2.3	2.4	3.1	4	4	4	4	4	5

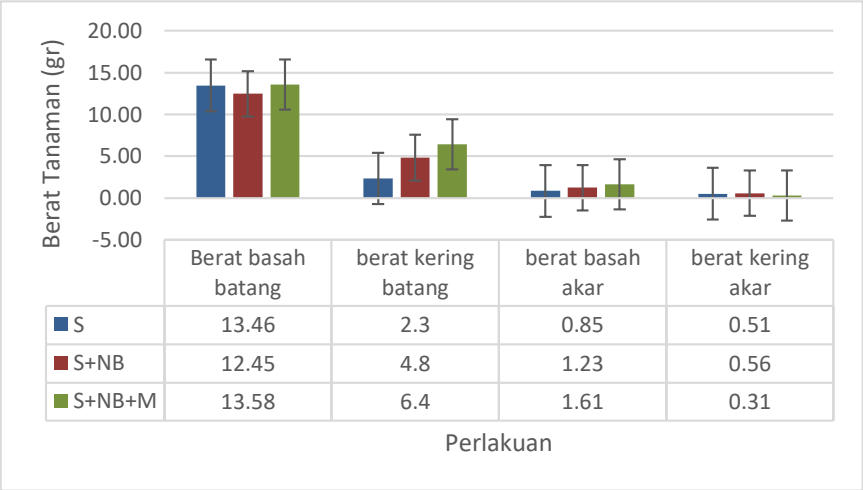
Gambar 4.10 Perbandingan Diameter Tanaman

Berdasarkan dengan grafik pada gambar 4.10 menunjukkan perbandingan dari pertumbuhan diameter batang tanaman dari setiap perlakuan bahan pembenah tanah. Untuk tanaman pada minggu ke-2 mendapatkan diameter batang yakni S (2,3mm), S+NB(2,5mm), dan S+NB+M (2,3mm) hingga pada minggu ke-18 diameter batang tanaman terus meningkat yakni tanaman dengan kode S (4mm), S+NB (5mm) dan S+NB+M (5mm).

Penggunaan bahan pembenah tanah NB serta NB + AMF pada tanah menunjukan nilai diameter batang yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman dengan kode S. Situasi ini dapat terjadi karena pemberian arang sekam padi pada tanah serta penambahan NB dan AMF yang mampu meningkatkan kandungan bahan organik tanah yang dapat mendukung penyerapan nutrisi tanah sehingga membuat nilai diameter batang tanaman menjadi lebih tinggi. Karena Pembentukan jaringan berkayu memerlukan pasokan fotosintat yang berkelanjutan dan ketersediaan fosfor yang memadai, karena fosfor berperan langsung dalam pembentukan ATP, asam nukleat, dan fosfolipid membran yang menjadi prasyarat aktivitas pembelahan sel kambium.

4.4.3 Biomassa Tanaman Uji

Perbandingan biomassa tanaman terdiri dari biomassa basah dan kering dari setiap perlakuan tanaman. Biomassa basah didapatkan dari penimbangan setalah dipisahkannya bagian batang dan bagian akar tanaman saat pemanenan. Dan data biomassa kering dari penimbangan jariangan akar dan batang setelah proses pengeringan pada oven suhu 50˚ selama 3 hari (72 jam). Berikut data perbandingan hasil pengukuran biomassa tanaman uji :



	Berat basah batang	berat kering batang	berat basah akar	berat kering akar
S	13.46	2.3	0.85	0.51
S+NB	12.45	4.8	1.23	0.56
S+NB+M	13.58	6.4	1.61	0.31

Gambar 4.11 Biomassa Tanaman

Sesuai dengan gambar 4.11, hasil grafik yang didapat menunjukkan adanya hasil yang beragam. Pada diagram berat basah batang, rata – rata data untuk perlakuan S didapat 13,5 gr dan didapat berat kering batang seberat 2,3 gr, berat akar basah didapat 0,8 gr, berat akar kering yakni 0,5 gr. untuk perlakuan tanaman kode S+NB berat batang basah 12,4 gr, berat batang kering 4,8 gr, dengan berat akar basah 1,2 gr dan berat akar kering 0,3 gr. Untuk perlakuan tanaman dengan kode S+NB+M berat batang basalah didapat 13,6 gr, berat batang kering 6,4 gr, dengan berat akar basah 1,6 gr, dan berat akar kering seberat 0,3 gr.

Berdasarkan data tersebut, dapat dilihat jika berat kering batang memperlihatkan perbedaan yang sangat jelas. Penurunan kadar air yang disertai kenaikan berat kering pada S+NB dan S+NB+M menunjukkan bahwa jaringan yang terbentuk lebih padat, dan mengandung fotosintat tersimpan

dalam jumlah lebih besar diabandingkan dengan perlakuan S. Sehingga perlakuan S+NB+M unggul dalam akumulasi bahan kering. Penambahan nanobiochar dapat merubah karakteristik dari bahan organik terlarut tanah menjadi komponen humik dengan aromatisitas dan bobot molekul yang tinggi, dan dapat mengikat logam lebih sehingga terjadinya imobilisasi di tanah (Chen et al., 2023). AMF berperan sebagai pelindung bagian dinding sel fungi dan glikoprotein glomalin yang dapat menyerap logam berat, sehingga kadar logam yang mencapai jaringan batang dapat berkurang (Ferrol et al., 2016). Hal inilah mengapa peningkatan biomassa S+N+M bersifat aditif terhadap efek dari biochar.

Sehingga hasil dari biomaasa tanaman ini terbukti sesuai dimana peningkatan P_2O_5 dan penurunan toksistas dari Hg berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan dan biomassa tanaman. Hasil ini pula sejalan dengan dugaan bahwasanya ketersediaan fosfor yang lebih tinggi dapat mendukung proses metabolism dan perkembangan sistem perakaran tanaman. Kesesuaian ini menunjukan bawa rantai mekanisme dari imobilisasi Hg di tanah hingga peningkatan pertumbuhan tanaman berjalan sesuai dengan hipotesis pada sub bab 2.8.5.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai potensi Nano Biochar dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) pada tanah bekas tambang emas rakyat di Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pemberian *Nano Biochar* dan kombinasi *Nano Biochar* + AMF berpotensi memperbaiki kualitas tanah bekas tambang emas melalui peningkatan retensi logam merkuri (Hg) di dalam tanah, sehingga mobilitas dan ketersediaan hayati logam berat menjadi lebih rendah. Perlakuan kombinasi Nano Biochar dan AMF juga mampu menurunkan akumulasi Hg pada jaringan tanaman, terutama pada akar dan batang, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara fosfor (P_2O_5) di dalam tanah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua bahan pembenah tanah bekerja secara sinergis dalam mendukung proses remediasi tanah bekas tambang emas yang terkontaminasi merkuri.
2. Pemberian Nano Biochar dan kombinasi Nano Biochar + AMF berpotensi meningkatkan pertumbuhan *Melaluca cajuputi*. Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya biomassa kering tanaman, pertumbuhan tinggi tanaman, diameter batang, serta meningkatnya kandungan fosfor (P_2O_5) pada jaringan batang tanaman dibandingkan perlakuan kontrol. Kombinasi Nano Biochar dan AMF memberikan respons pertumbuhan terbaik karena mampu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara sekaligus mengurangi pengaruh toksisitas merkuri terhadap tanaman.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi dosis Nano Biochar dan AMF untuk memperoleh kombinasi perlakuan yang paling efektif dalam

meningkatkan kualitas tanah serta pertumbuhan tanaman pada lahan bekas tambang emas.

2. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan waktu pengamatan yang lebih panjang hingga fase pertumbuhan tanaman yang lebih lanjut sehingga efektivitas Nano Biochar dan AMF terhadap proses remediasi dapat diamati secara lebih komprehensif.
3. Pengujian parameter kualitas tanah dapat diperluas dengan menambahkan analisis sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, seperti pH, kandungan bahan organik, kapasitas tukar kation (KTK), aktivitas mikroorganisme tanah, serta logam berat lainnya agar mekanisme perbaikan tanah dapat dijelaskan secara lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelaaziz Farhaoui, Mohammaed Taoussi, Salah Eddine Laasli, Ikram Legirifi, Nizar El Mazouni, Abdelilah Meddich, Mohammed Hijri, Rachid Lahlali (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi and their role in plant disease control : A state of the art. Vol. 8 September 2025, 100438

Akcil, A., & Koldas,S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD) : Causes, treatment and case studies. Journal of Cleaner Production, 14(12-13), 1139-1145.

Ali Pramono, MMA Retno Rosariastuti, Ngadiman dan Irfan D. Prijambada (2012). Peran Rizobakteri dalam Fitoekstraksi Logam Berat Kromium pada Tanaman Jagung. Ecolab Vol. 6 No. 1 January 2019 : 1 - 60

Arden Arya Pratama (2023). Potensi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) Terhadap Acacia Mangium Untuk Bio Fitoremediasi TPA Piyungan. *Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik Lingkungan.*

Balai Penelitian Tanah. (2009). Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk (Edisi ke-2). Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.

Chen, W., Yu, Z., Yang, X., Wang, T., Li, Z., Wen, X., He, Y., & Zhang, C. (2023). Unveiling the role of dissolved organic matter on the Hg phytoavailability in biochar-amended soils. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(4), 3761. https://doi.org/10.3390/ijerph20043761

Dewi, A.K. (2017). Kajian Kerusakan Lingkungan Perairan Sungai Plampang Akibat Pencemaran Limbah Pertambangan Emas di Desa Kalirejo Kecamatan Kokap Kabupaten Kulon Progo. Tesis. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Provinsi Bali, (2023). Evaluasi Kesesuaian lahan bagi tanaman strategis

Drace, K., Kriefer, A., Veiga, M.M., Williams, M.K., Ascari, B., Knapper, K. A. & Reidy, L. (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

Ferrol, N., Tamayo, E., & Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: From mechanisms to biotechnological applications. Journal of Experimental Botany, 67(22), 6253–6265. https://doi.org/10.1093/jxb/erw403

Gani, A. (2009). Potensi arang sekam padi sebagai amelioran tanah dan sumber silika bagi tanaman. Balai Besar Penelitian Tanaman Padi.

González-Chávez, M. C., Carrillo-González, R., Wright, S. F., & Nichols, K. A. (2004). The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. Environmental Pollution, 130(3), 317–323. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.004

Hilson, G., & McQuilken, J. (2014). Four decades of support for artisanal and small - scale mining in Sub-Sahara Africa. The Extractive Industries and Society 1 (1).

Indra. M. A. (2022). Potensi Penggunaan Pembenah Tanah dan Mikroorganisme untuk Stabilisasi Tanah Bekas Tambang EMas (Studi Kasus : Tambang Emas Desa Kalirejo, Kulonprogo, DIY). Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Grand Design, Pengurangan dan Penghapusan Merkuri pada Pertambangan Emas Skala Kecil, 2017.

Kim, K.-H., Kabir, E., & Jahan, S. A. (2019). A review on the distribution of Hg in the environment and its human health impacts. Journal of Hazardous Materials, 306, 376–385.

Kochian, L.V., Hoekenga, O.A., & Pineros, M.A (2004). How to do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. Annual Review of Plant Biology, 55, 459-493.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge.

Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.

Mawaddah, M., Mansur, L, & Saria, L (2012). Pertumbuhan Kayu Putih (Melaleuca Leucadendron Linn) dan Longkida (Nauclea orientalis Linn) pada Kondisi Tergenang Air Asam Tambang. Journal Silvikultur Tropika, 3 (2)

Mendez, M.0., & Maier, R.M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments – an emerging remediation technology. Environmental Health Perspective, 116(3), 278-283.

Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. Biotechnology Advances, 29 (6).

Mohd, S.N., Majid, N.M., Shazili, N.A.M., & Abdu, A. (2013). Growth Performance, Biomass, and Phytoextraction Efficiency of Acacia Mangium and Melaleuca Cajuput in Remediating Heavy Metal Contaminated Soil. *American Journal of Environmental Science,* 9 (4).

Muhajir, M., Syaried,A.N., & Wica, P.Y. (2025). Teknologi dan karakterisasi dalam proses produksi arang sekam padi untuk berbagai aplikasi. Jurnal Engine; Energi, Manufaktur, dan Material, 9(2), 265-275.

Mycelia Paradise (2023). Dampak Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan pada Penambangan Emas Skala Kecil di Kulon Progo. *Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Indonesia.* Vol.3, No. 1, Tahun 2023.

Panji Romadhan, Gusmini, Hermansah (2022) Perbaikan Sifat Kimia Tanah Bekas Tambang Emas Melalui Aplikasi Pupuk Organik Granul Biokanat. *Agritrop: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 20(1), 74–83.

Phytostabilization of cadmium and lead in maize using biochar and nanobiochar: Effects on soil properties and metal dynamics. (2026). *International Journal of Phytoremediation, 28*(7).

Prasetyo, B., Krisnayanti, B.D., Utomo, W.H., & Anderson, C.W.N. (2010). Rehabilitation of Artisanal Mining Gold Land In West Lombok, Indonesia 2 : Arbuscular mycorrhizall Status of Tailings and Surrounding Soil. Journal Agricultural Science, 2 (2).

Pusat Penelitian Tanah (1983). Kriteria Penilaian sifat kimia tanah (Publikasi no 59).

Ramanayaka S, Daniel C.W.Tsang, Deyi Hou, Yong Sik Ok, Meththika Vithanage (2020). Green synthesis of graphitic nanobiochar for the removal of emerging contaminants in aqueous media. Science of the Total Environment, 706 : 135.

Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. Canadian Journal of Soil Science, 84(4).

Rizki Rilda Aulia, Agus Jatnika Effendi (2020). Penyisihan Merkuri (Hg) dari Air Haisl Pencucian Tanah Menggunakan Adsorben GAC Terimpregnasi Fe dan Ce. Jurnal Teknik Lingkungan, 26(1).

Santoso (2018). Kelayakan Teknis Penambangan Emas pada Wilayah Petambangan Rakyat. *Journal Science Tech,* 4 (1).

Severo, F. F., da Silva, L. S., Moscôso, J. S. C., Sarfaraz, Q., Rodrigues Júnior, L. F., Lopes, A. F., Marzari, L. B., & Dal Molin, G. (2020). Chemical and physical characterization of rice husk biochar and ashes and their iron adsorption capacity. *SN Applied Sciences, 2,* 1286.

Severo, F. F., da Silva, L. S., Moscôso, J. S. C., Sarfaraz, Q., Rodrigues Júnior, L. F., Lopes, A. F., Marzari, L. B., & Dal Molin, G. (2020). Chemical and physical characterization of rice husk biochar and ashes and their iron adsorption capacity. SN Applied Sciences, 2, 1286.

Sheoran, V., Sheoran, A.S., & Poonia, P. (2010). Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation : A review. International Journal of Soil, Sediment and Water, 3(2), Article 13.

Shinta Elvita Bella, Moli Monikasari, Zulkardesi (2021). Potensi Pemanfaatan Biochar Untuk Remediasi Lahan Bekas Tambang di Indonesia. Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas. Vol. 20 No. 2 August 2021.

Siti Fatimah Batubara, Evawaty Sri Ulina, Novia Chairuman, Jeannette Maryanty Lumban Tobing, Vivi Aryati, Erpina Delina Manurung, Hendri Ferianson Purba, Dorkas Parhusip. (2023). Evaluasi Status Hara Makro Nitrogen, Fosfor dan Kalium. *Agrikultura,* Universitas Padjadjaran.

Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.). Academic Press.

Tanaka, S., Kobayashi, T., Iwasaki, K., Yamane, S., Maeda, K., & Sakurai, K. (2003). Properties and metabolic diversity of microbial communities in soils treated with steam sterilization compared with methyl bromide and chloropicrin fumigations. Soil Science and Plant Nutrition, 49(4), 603–610.

Usman Zulfiqar, Fasih Ullah Haider, Muhammad Ahmad, Saddam Hussain, Muhammad Faisal Maqsood, Muhammaf Ishfaq, Babar Shahzad, Muhammad Mohsin Waqas, Basharat Ali, Muhammad Noaman Tayyab, Syed Amjad Ahmad, Ilyas Khan, and Sayed M. Eldin (2023). Chromium toxicity, speciation, and remediation strategies in soil - plant interface : A Critical review. Frontiers in plant science

Vanek, S. J., & Lehmann, J. (2015). *Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar*. *Plant and Soil, 395*, 105–123.

Vidali, M. (2016). Bioremediation : An overview. Pure and Applied Chemistry, 73 (7).

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment, 368(2–3), 456–464. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016

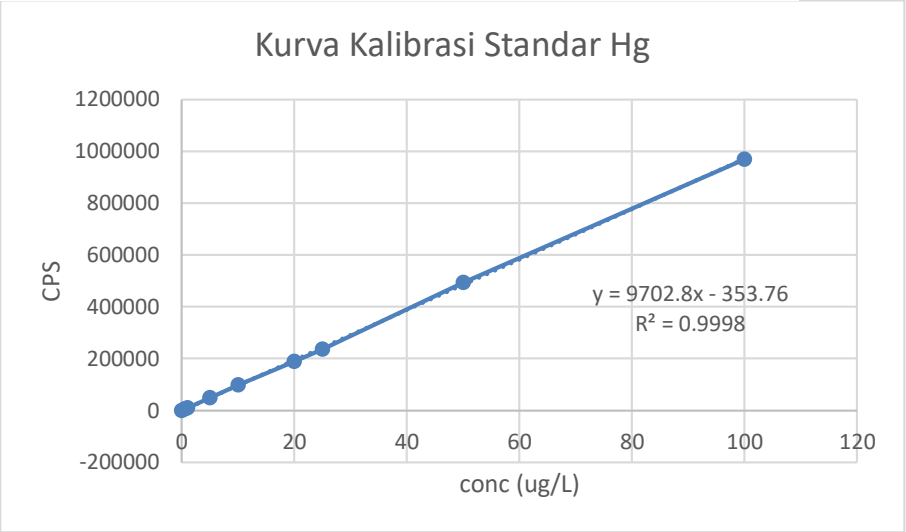
Zhang, L., Chang, L., Liu, H., Alquiza, M. J. P., & Li, Y. (2025). *Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: A review*. *Biochar, 7*, 13.

Zhang, N., Xing, J., Wei, L., Liu, C., Zhao, W., Liu, Z., Wang, Y., Liu, E., Ren, X., Jia, Z., Wei, T., Siddique, K. H. M., & Zhang, P. (2025). The potential of biochar to mitigate soil acidification: A global meta-analysis. *Biochar, 7*, 49.

Zheng, Y., Zhou, Z., Han, F., (2025). Role of Biochar-based Nanocomposites in Soil Remediation: Heavy Metal Immobilization and Ecological Safety. Environmental Chemistry and Safety, 1(2).

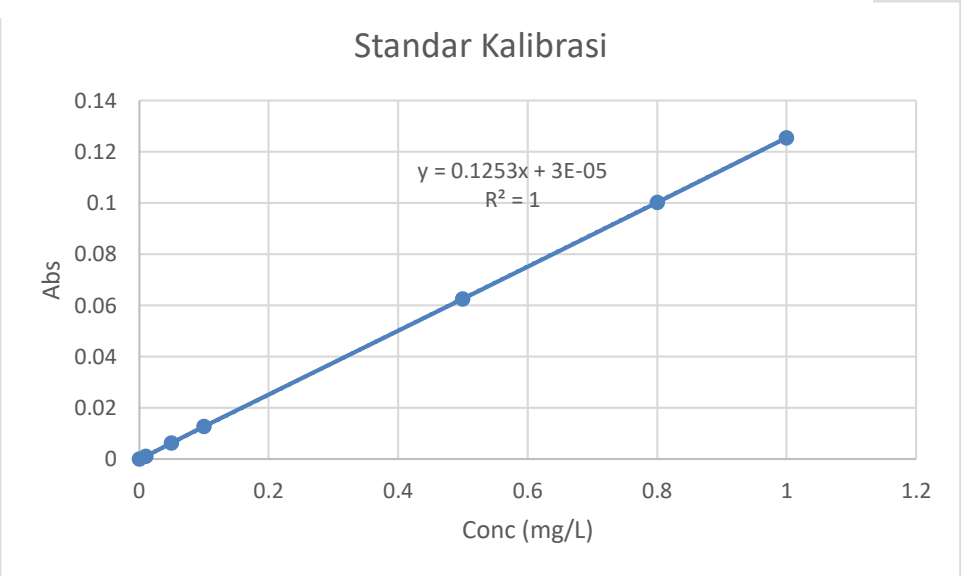
LAMPIRAN

Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Standar 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	

Lampiran 2 Kurva Kalibrasi Standar P



Deret Standar				
No	**Standar**	**conc**	**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	

Lampiran 3 Contoh Perhitungan

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

Kombinasi Tanah + Sekam Padi + Nanobiochar + Mychorriza (S+NB+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	= 2,5333
Faktor konversi PO_4 menjadi P_2O_5	= 142/190

a. Perhitungan Kadar P (ppm)

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

$$= \frac{(0{,}06-0{,}000343)}{0{,}1253}$$

$$= 0{,}479 \text{ ppm}$$

b. Perhitungan P_2O_5 Tersedia

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

$$= 0{,}479 \text{ ppm} \times \frac{10\ ml}{1000\ ml} \times \frac{1000\ \text{g}}{2.5333\ g} \times 20 \times \frac{142}{190} \times 1$$

$$= 28{,}24 \text{ mg/kg}$$

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

Pada Jaringan Batang Tanaman dengan Kombinasi Perlakuan Tanah + Sekam Padi + Nanobiochar + Mychorriza (S+NB+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 = 3,10
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}) = kadar P × $\frac{10\ ml}{1000\ ml}$ × $\frac{100\ g}{gr\ contoh}$ × fp × f.konversi PO_4 ke P_2O_5× fk

= 0,415 × $\frac{10\ ml}{1000}$ × $\frac{100\ g}{3,10\ g}$ × 20 × $\frac{142}{190}$ × 1,04

= 9,01 mg/100g

C. Perhitungan Kadar Merkuri (Hg) pada Tanah

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

Dik :
Konsentrasi (C) = 0,01019
Volume akhir destruksi (V) ml = 50
Berat contoh uji (W) g = 0,55
Fraksi padat (P) = 1
Faktor pengenceran (fp) = 100

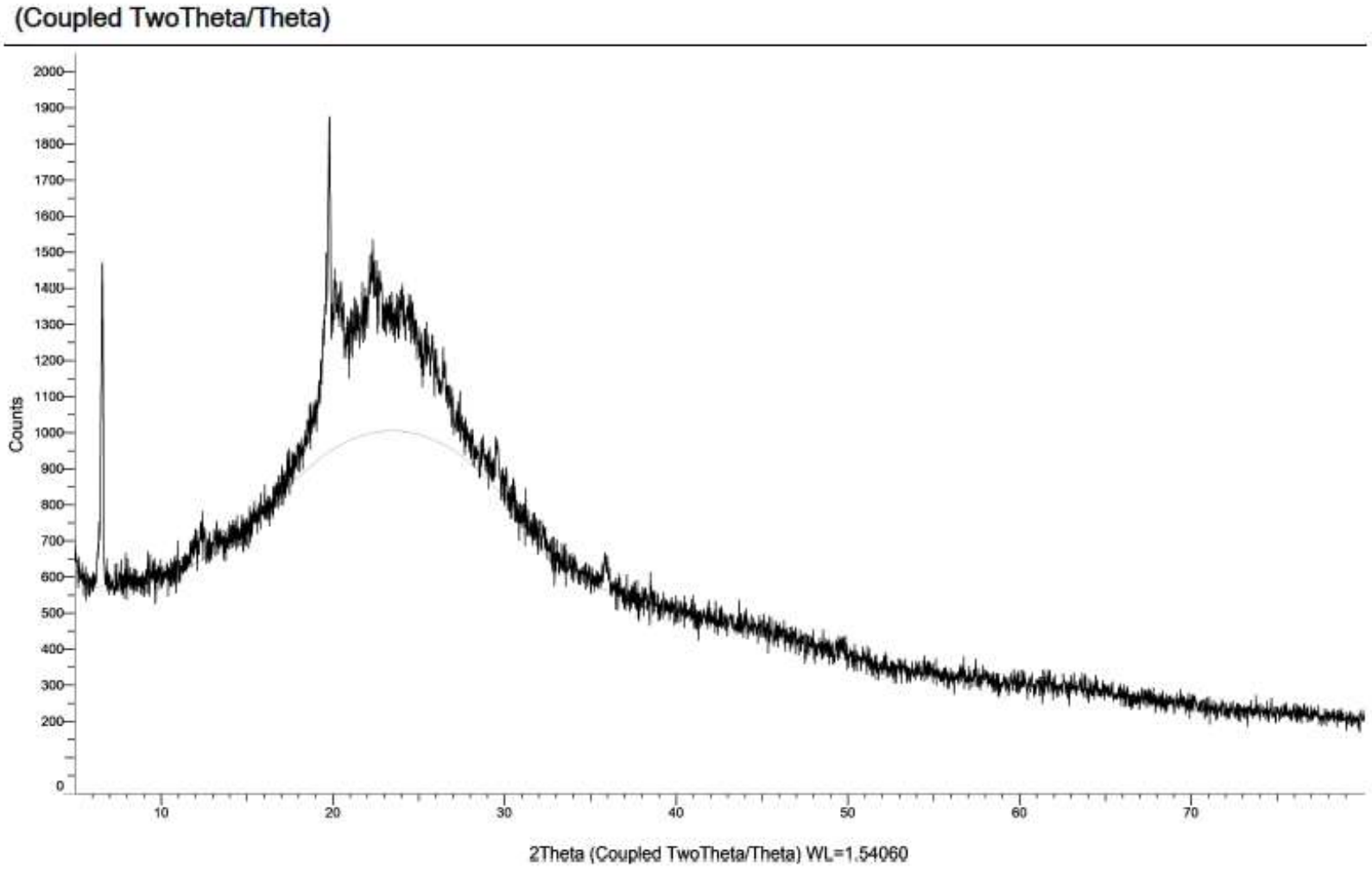
Perhitungan :

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

=$\frac{0,01019 \times 50}{0,55 \times 1}$ × 100

=111,528 mg/kg

Lampiran 4 Grafik XRD Nanobiochar



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 5 Dokumentasi Kegiatan



Alat strelisisasi



Penghancuran tanah



Penambahan *Nano Biochar*



AMF



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



Shinta Maharani Dewi, kerap disapa Shinta. Lahir di Poncowati 06 Mei 2004, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Adapun penulis telah melalui jenjang pendidikan MI.Istiqomah Sekayu, SMP N 6 Unggul Sekayu, kemudian mendapatkan beasiswa penuh sebagai siswa di SMA N Sumatera Selatan, dan menempuh pendidikan program studi S1- Teknik Lingkungan di Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta dengan beasiswa penuh UII.

Selama perkuliahan penulis aktif berkontribusi dan berperan pada kegiatan lembaga seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) sebagai Sekretaris selama 2 periode dan Dewan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (DPM FTSP) dengan jabatan Sekretaris Jenderal selama periode 2024/2025. Pada kegiatan kepanitiaan pula penulis menjadi bagian dalam penyelenggara kegiatan *Enviro Champions* 2023, dan Lintas Lingkungan 2023. Penulis pula berkesempatan menjadi pembicara dalam kegiatan Latihan Dasar Kedisiplinan (LDK) 2025. Pada aspek akademik, penulis sebanyak 2 kali telah berkontribusi menjadi asisten praktikum pada semester 3 dengan mata kuliah Praktikum Kimia Lingkungan dan semester 7 pada mata kuliah Praktikum Laboratorium Lingkungan. Pada bulan februari 2026 penulis telah menyelesaikan Kerja Praktik di PT. Tekno Buana Globalindo, Bandung di *operation department*. Dan pada bulan april 2026 penulis memulai penelitian di *greenhouse* Bu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. dan Laboratoirum Kualitas Lingkungan untuk menyelesaikan tugas akhir.