TA/TL/2026/2136

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi*, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap *Melaleuca Cajuputi* Sebagai Agen Remediasi Lahan Bekas Tambang Emas Rakyat di Kabupaten Kulon Progo

Alya Melan Anggraini Suwae
22513105

Dosen Pembimbing:
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

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

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Chitosan, and Soil Ameliorants to Melaleuca Cajuputi as Remediation Agents for Artisanal Small-scale Gold Mining (ASGM) in Kulon Progo Regency

Alya Melan Anggraini Suwae
22513105

Supervisor:
Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

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

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi*, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap *Melaleuca Cajuputi* Sebagai Agen Remediasi Lahan Bekas Tambang Emas Rakyat di Kabupaten Kulon Progo

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

Alya Melan Anggraini Suwae

22513105

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. (Penguji 1)

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. (Penguji 2)

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

31/8-26

Arya Kusuma, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

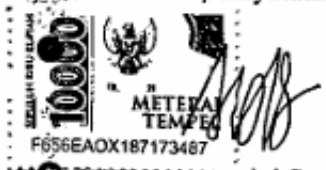
Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

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, 27 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Aiya Melan Anggraini Suwae

22513105

PRAKATA

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Penulisan laporan ini mencakup pelaksanan penelitian yang panjang yang telah melibatkan bantuan, dukungan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa syukur dan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, yang selalu memberikan kesehatan, kemampuan, serta pertolongan sehingga penulis bisa mengerjakan dan menyelesaikan penelitian hingga penulisan Laporan Tugas Akhir dengan lancar.
2. Kedua orang tua saya, Dr. Habel Melkias Suwae, S.Sos., M.M. dan Anita Ampel, yang merupakan panutan dan penyemangat saya. Terima kasih karena sudah selalu mendukung dan mempercayai saya. Saya juga berterima kasih kepada keluarga besar Suwae-Ampel terutama nenek saya, Duyu Tungkagi, yang setiap saat mendoakan saya serta kakak saya, Hems Lisye Suwae, S.T., yang senantiasa memberikan dukungan kepada saya.
3. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan kesempatan, bantuan, serta bimbingan kepada penulis. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D., selaku dosen penguji 1Tugas Akhir dan dosen pembimbing akademik penulis yang senantiasa menginspirasi dan membimbing penulis dari awal hingga akhir masa perkuliahan. Penulis juga berterima kasih kepada Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng., selaku dosen penguji Tugas Akhir, yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis selama pelaksanaan Tugas Akhir.
4. Anggota KKN 71 UII Unit 393, yang merupakan sahabat terbaik penulis. Terima kasih sudah menjadi orang-orang paling baik yang penulis kenal dan telah memberikan dukungan terbaik untuk penulis.

5. Teman-teman Teknik Lingkungan Angkatan 2022 terutama Andien, Dinur, Jeki, Jia, Kaka, Tsany, Westyn, dan Chika, terima kasih sudah menjadi teman dan rekan yang senantiasa mendukung penulis baik selama di bangku perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman kelompok Tugas Akhir yakni Nisa, Qina, Shinta, dan Sheila, yang telah membantu satu sama lain selama pelaksanaan Tugas Akhir.
7. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis selama berada di bangku perkuliahan hingga penulisan Tugas Akhir ini sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik.
8. Penulis, yakni diri saya sendiri. *Between dreams*, *books*, *power*, *and walls*, *I learned how dynamic the world is yet we're enduring it so well*. *Things passed, for everything happened we shall thanks and for every regret we shall learn*. *Inspired by Pony*, "*we will find the better day and long long future*".

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran serta kritik yang membangun untuk perkembangan tulisan ini. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak.

Sleman, 27 Agustus 2026

Alya Melan Anggraini Suwae

Potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi*, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap *Melaleuca Cajuputi* Sebagai Agen Remediasi Lahan Bekas Tambang Emas di Kabupaten Kulon Progo

Mahasiswa : Alya Melan Anggraini Suwae
NIM : 22513105
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

Abstrak

Tambang emas rakyat di Indonesia banyak menggunakan merkuri (Hg) dalam proses ekstraksi emas sehingga menyebabkan pencemaran logam berat dan kemiskinan hara pada tanah bekas tambang. Salah satu lokasi tambang emas rakyat terdampak berada di Kabupaten Kulon Progo, DIY. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas biofitoremediasi menggunakan *Melaleuca cajuputi* dengan *arbuscular mycorrhizal fungi* (AMF), *chitosan*, dan bahan pembenah tanah seperti kompos dan arang sekam, dalam meningkatkan laju pertumbuhan tanaman dan menyerap logam berat merkuri (Hg). Jenis AMF yang digunakan yakni *Glomus* sp., dan *chitosan* berjenis *shrimp shell chitosan*. Pengujian merkuri menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometric* (ICP-MS), sedangkan fosfor menggunakan spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi *soil* + *compost* + *chitosan* + AMF memiliki pertumbuhan diameter (4,00 mm) dan biomassa tanaman terbaik (0,69 g berat kering akar; 2,36 g berat kering batang), adapun *soil* + *compost* + *chitosan* meraih tinggi tanaman tertinggi (59,7 cm). Kadar fosfor tersedia di tanah terbesar ditemukan pada *soil* + *compost* (31,34 mg/kg), sedangkan fosfor total tertinggi pada jaringan tanaman ditempati oleh *soil* + *compost* di bagian akar (15,65 mg/100g) dan *soil* + *compost* + *chitosan* di bagian batang (11,50 mg/100g). Penyerapan merkuri tanah terbesar dicapai oleh *soil* + *compost* (99,66 mg/kg). Untuk jaringan tanaman, kombinasi *soil* + *compost* menyerap merkuri terbanyak di bagian akar tanaman (23,54 mg/kg), dan *soil* + *compost* + *chitosan* mentranslokasikan merkuri tertinggi pada batang tanaman (85,50 mg/kg). Secara keseluruhan, kombinasi *soil* + *compost* + *chitosan* menempati posisi unggul di banding kombinasi lainnya dalam meremediasi tanah bekas tambang emas rakyat.

Kata kunci: *arbuscular mycorrhizal fungi*, biofitoremediasi, *melaleuca cajuputi*, *shrimp shell chitosan*, tambang emas rakyat.

Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Chitosan, and Soil Ameliorants to Melaleuca Cajuputi as Remediation Agents for Small-scale Gold Mining in Kulon Progo Regency

Student : Alya Melan Anggraini Suwae
Student Number : 22513105
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D.

Abstract

Small-scale gold mining in Indonesia frequently employs mercury (Hg) *during extraction*, *resulting in heavy metal contamination and nutrient depletion in post-mining soils*. *One affected site is located in Kulon Progo Regency*, DIY. *This study aimed to evaluate the effectiveness of a bio-phytoremediation using Melaleuca cajuputi with arbuscular mycorrhizal fungi* (AMF), *chitosan*, *and soil ameliorants*, *especially compost and rice husk charcoal in enhancing plant growth and mercury uptake*. *The* AMF *species used was Glomus sp*., *and the chitosan derived from shrimp shells*. *Mercury analyzed with Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), *while phosphorus via UV-Visible* (UV-Vis) *spectrophotometry*. *The results indicated that the soil + compost + chitosan +* AMF *combination yielded the best diameter growth* (4.00 mm) *and plant biomass* (0.69 g *root dry weight*; 2.36 g *stem dry weight*), *whereas the soil + compost + chitosan achieved greatest plant height* (59.7 cm). *The highest level of available soil phosphorus found in the soil +* compost (31.34 mg/kg), *meanwhile the highest total phosphorus content in the roots achieved by soil + compost* (15.65 mg/100g) *and in the stems is soil + compost + chitosan*. *The highest soil mercury uptake was achieved by the soil + compost* (99.66 mg/kg). *Regarding plant tissues*, *soil + compost absorbed the most mercury in the roots* (23.54 mg/kg), *while the soil + compost + chitosan resulted in the highest mercury translocation to the stems* (85.50 mg/kg). *Overall*, *the soil + compost + chitosan combination outperformed the other treatments in remediating soil from small-scale gold mining sites*.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi, *bio-phytoremediation*, *melaleuca cajuputi*, *shrimp shell chitosan*, *small-scale gold mining*.

DAFTAR ISI

PRAKATA i
ABSTRAK iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR LAMPIRAN x
BAB I PENDAHULUAN 11
1.1 Latar Belakang 11
1.2 Perumusan Masalah 13
1.3 Tujuan Penelitian 13
1.4 Manfaat Penelitian 14
1.5 Ruang Lingkup 14
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 15
2.1 Pertambangan Emas di Indonesia 15
2.1.1 Pertambangan Emas Tradisional 16
2.2 Karakteristik Tanah Bekas Tambang Emas 17
2.2.1 Fisika 17
2.2.2 Kimia 17
2.2.3 Biologis 18
2.3 Keberadaan Logam dan Unsur Hara di Tanah Tambang Emas 18
2.3.1 Merkuri (Hg) 19
2.3.2 Fosfor (P) 20
2.4 Metode Remediasi Tanah Bekas Tambang Emas 21
2.4.1 Bioremediasi 21
2.4.2 Fitoremediasi 22
2.4.2.1 *Melaleuca Cajuputi* 22
2.4.3 Bahan Pembenah Tanah (*Soil Ameliorant*) 22
2.4.3.1 *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) 23
2.4.3.2 *Chitosan* 23
2.4.3.3 Pupuk Kompos 24
2.4.3.4 Arang Sekam 25

2.5 Penelitian Terdahulu 25
BAB III METODE PENELITIAN 28
3.1 Kerangka Penelitian 28
3.1.1 Persiapan Sampel Tanah 29
3.1.2 Persiapan Kompos & Arang Sekam 30
3.1.3 Persiapan Inokulum Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) 30
3.1.4 Persiapan Media Tanam 31
3.1.5 Penanaman Tanaman 32
3.1.6 Pemeliharaan & Pengamatan Tanaman 32
3.1.7 Pemanenan Tanah & Tanaman 33
3.1.8 Pengujian Laboratorium & Analisis Data 33
3.2 Pengumpulan Data 34
3.2.1 Data/Variabel/Parameter 34
3.2.2 Waktu dan Lokasi 35
3.2.3 Alat dan Bahan 35
3.3 Analisis Data 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 38
4.1 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap pH 38
4.2 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap Logam Merkuri (Hg) 40
4.2.1 Kadar Hg dalam Tanah 40
4.2.2 Kadar Hg dalam Jaringan Tanaman 43
4.3 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap Nutrien Fosfor (P) 46
4.3.1 Kadar P_2O_5 dalam Tanah 46
4.3.2 Kadar P_2O_5 dalam Jaringan Tanaman 48
4.4 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap Laju Pertumbuhan Tanaman *Melaleuca Cajuputi* 50
4.4.1 Diameter & Tinggi Tanaman 50
4.4.2 Biomassa Tanaman 53
BAB V PENUTUP 55
5.1 Kesimpulan 55

5.2 Saran 55
DAFTAR PUSTAKA 57
LAMPIRAN 65
Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Larutan Standar Parameter Uji Logam Merkuri (Hg) dan Nutrien Fosfor (P) 65
Lampiran 2 Contoh Perhitungan 66
Lampiran 3 Hasil Uji XRD *Chitosan* 68
Lampiran 4 Dokumentasi Kegiatan 70
RIWAYAT HIDUP 74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu 26
Tabel 3.1 Karakteristik *Shrimp Shell Chitosan* 31
Tabel 3.2 Perlakuan Sampel Uji 32
Tabel 3.3 Parameter & Metode Uji 34
Tabel 3.4 Alat Penelitian 35
Tabel 3.5 Bahan Penelitian 37
Tabel 4.1 Baku Mutu pH Tanah H_2O 39
Tabel 4.2 Standar Kandungan Logam Berat Merkuri pada Tanah 41
Tabel 4.3 Standar Baku Mutu Ketersediaan P_2O_5 dalam Tanah 47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lokasi Pertambangan Emas Skala Kecil Ilegal di Indonesia 15
Gambar 2.2 Peran *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) Terhadap Tanah dan Tanaman 23
Gambar 2.3 Preparasi Pembuatan *Chitosan* Dengan Limbah Cangkang Udang 24
Gambar 3.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian 28
Gambar 3.2 Peta Lokasi Titik Sampling 29
Gambar 4.1 Grafik pH Tanah Pra dan Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, serta AMF 40
Gambar 4.2 Grafik Kadar Hg dalam Tanah Pra dan Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, serta AMF 42
Gambar 4.3 Grafik Kadar Hg dalam Akar Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF 43
Gambar 4.4 Grafik Kadar Hg dalam Batang Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF 44
Gambar 4.5 Grafik Kadar P_2O_5 dalam Tanah Pra dan Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, serta AMF 46
Gambar 4.6 Grafik Kadar P_2O_5 dalam Akar Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF 48
Gambar 4.7 Grafik Kadar P2O5 dalam Batang Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF 49
Gambar 4.8 Grafik Perbedaan Diameter Tanaman *Melaleuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF 50
Gambar 4.9 Grafik Perbedaan Tinggi Tanaman *Melaleuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF 52
Gambar 4. 10 T Tinggi Tanaman *Mealeuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF Pasca Pemanenan 52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Larutan Standar Parameter Uji Logam Merkuri (Hg) dan Nutrien Fosfor (P) 65
Lampiran 2 Contoh Perhitungan 66
Lampiran 3 Hasil Uji XRD *Chitosan* 68
Lampiran 4 Dokumentasi Kegiatan 70

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan sumber daya alam yang melimpah. Sumber daya ini tersebar di berbagai sektor, baik sektor pangan maupun non-pangan seperti mineral dan energi. Pada sektor mineral, Indonesia memiliki berbagai jenis mineral, salah satunya mineral emas. Pertambangan emas di Indonesia kebanyakan didominasi oleh perusahaan besar dengan investor asing, namun rakyat Indonesia juga turut serta melakukan penambangan dengan skala kecil yang dikenal sebagai *Artisanal and Small-Scale Gold Mining* (ASGM) atau Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK).

PESK merupakan kegiatan pertambangan emas yang umumnya dilakukan secara perorangan atau operator berskala kecil dengan modal investasi dan produksi yang terbatas (Marwanza dkk., 2024). PESK ini berperan besar dalam membuka lapangan kerja dan memenuhi kebutuhan ekonomi masyarakat, terutama yang berasal dari kelas sosial menengah ke bawah (Meutia dkk., 2022). Meskipun praktik pengelolaan dan pendapatan hasil terbilang cukup mudah, sebagian besar kegiatan PESK masih dilakukan secara ilegal sehingga mengakibatkan permasalahan lingkungan dan kesehatan. Salah satu tantangan utama yang memicu permasalahan tersebut adalah penggunaan merkuri dan sianida dalam proses pengolahan emas.

Proses penambahan merkuri dalam pengolahan emas dikenal dengan metode amalgamasi. Metode ini dilakukan dengan cara mencampurkan merkuri ke dalam konsentrat emas dan *ore* sehingga terbentuk amalgam (berupa larutan padat) antara merkuri dan emas (Salam dkk., 2024). Amalgam ini kemudian akan dipisahkan melalui proses pemanggangan dalam *retort* (*retorting*) agar kandungan merkuri menguap dan dapat dipisahkan dari emas. Metode ini memberikan hasil yang instan namun terdapat banyak dampak negatif yang turut diberikan.

Limbah merkuri yang dilepaskan ke lingkungan akan mencemari udara, tanah, dan air, serta menganggu rantai makanan melalui bioakumulasi (Mestanza-Ramón dkk., 2022). Paparan merkuri yang sampai ke tubuh manusia dapat menyebabkan gangguan pada sistem pernafasan, saraf, reproduksi, bahkan memicu permasalahan kesehatan lebih besar seperti yang terjadi di fenomena *Minamata disease* (Hamada & Osame, 2023). Selain itu, degradasi

kualitas tanah pasca-tambang yang ekstrem menyebabkan lahan tersebut menjadi tidak produktif. Secara fisik, tanah bekas tambang didominasi oleh material *tailing* yang bertekstur kasar dan sangat kering sehingga tidak bisa menjadi media tanam tumbuhan (Riko dkk., 2024). Secara kimiawi, tanah bekas tambang memiliki keasaman tanah (pH) yang tinggi dan unsur hara (N, P, K) yang sangat minim (Aryanti & Hera, 2026). Hal ini menjadikan tanaman sulit tumbuh akibat kekurangan nutrisi yang berujung pada kematian bibit tanaman (*low survival rate*). Selain merkuri, kandungan logam yang dominan pada lahan bekas PESK berupa Timbal (Pb), Aluminium (Al), dan Arsen (As) (Aryanti & Hera, 2025; Panggabean dkk., 2022; Romadhan dkk., 2022) . Dengan berbagai degradasi yang dialami, perlu dilakukan upaya remediasi tanah pasca kegiatan tambang untuk memperbaiki kondisi lingkungan bahkan mengembalikannya seperti semula untuk mendukung kehidupan makhluk hidup di sekitarnya.

Metode remediasi merupakan strategi rehabilitasi lingkungan untuk mengurangi dan/atau menghilangkan kontaminan berbahaya yang berada di area tercemar tersebut. Metode ini dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan baik secara fisik, kimia, dan biologis (Atemoagbo, 2024). Pemilihan metode remediasi disesuaikan dengan mempertimbangkan jenis dan konsentrasi kontaminan; lokasi dan kondisi area tercemar; karakteristik tanah; hingga biaya dan waktu yang dibutuhkan. Dalam penelitian ini, penelitian dilaksanakan terhadap lahan bekas tambang emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kabupaten Kulon Progo memiliki cadangan emas yang telah dimanfaatkan oleh warga setempat sejak tahun 1991 menggunakan metode amalgamasi (Nata dkk., 2021). Menurut Nata dkk. (2021), metode ini melepaskan kandungan merkuri yang tinggi untuk lingkungan sehingga peneliti mengupayakan metode remediasi melalui bioremediasi dalam penanganannya.

Bioremediasi adalah metode remediasi dengan menggunakan mikroorganisme untuk mengurangi konsentrasi/toksisitas senyawa kimia dengan memanfaatkan pencemar sebagai sumber nutrisi bagi mikroorganisme. Tidak terbatas pada mikroorganisme, bioremediasi juga dapat menggunakan tanaman sebagai agen remediasi atau dikenal sebagai metode fitoremediasi. Dalam praktiknya, bioremediasi kerap dikombinasikan antara tanaman dan mikroorganisme untuk mendapatkan hasil yang optimal. Pada penelitian ini, peneliti menggabungkan agen bioremediasi berupa tanaman *Melaleuca Cajuputi* dengan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Chitosan*.

Tanaman kayu putih (*Melaleuca Cajuputi*) dikenal dengan kemampuan adaptasinya yang tinggi dan mampu bertahan di segala kondisi lingkungan (Juliarti & Mansur, 2022). Sedangkan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* memiliki kemampuan yang handal dalam mengikat mineral dan melindungi akar dari stres abiotik (Wahab dkk., 2023). *Chitosan* yang terbuat dari cangkang udang memiliki kandungan protein, mineral, polisakarida, oksigen, yang tinggi dan gugus fungsional yang mengandung nitrogen dan efektif dalam adsorpsi ion logam (Rahman dkk., 2023). Dalam proses bioremediasi tanah tambang, *chitosan* meningkatkan proteksi tanaman akan faktor biotik dan abiotik selama proses inokulasi serta menyediakan nutrisi dan mobilisasi bagi sel mikroba (Rai dkk., 2025). Peneliti juga menambahkan kompos dari kohe kambing dan arang sekam padi sebagai bahan pembenah tanah uji. Pemberian bahan-bahan ini dapat meningkatkan pH tanah dan kandungan nutrisi yang dibutuhkan tanaman (Citra dkk., 2025). Penelitian ini diharapkan dapat mengungkap efektivitas kombinasi *Melaleuca Cajuputi*, *Arbuscular Mycorrhizal Fungi*, *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah dalam mengurangi kadar logam berat dari aktivitas pertambangan emas rakyat.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1) Bagaimana potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah terhadap laju pertumbuhan tanaman dan kandungan nutrien fosfor (P) pada tanaman *Melaleuca Cajuputi* di tanah bekas pengolahan tambang emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta?
2) Bagaimana potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah dalam penyerapan logam berat merkuri (Hg) pada tanah bekas pengolahan tambang emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1) Mengetahui potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah terhadap laju pertumbuhan tanaman dan kandungan nutrien fosfor (P) pada tanaman *Melaleuca Cajuputi* di tanah bekas

pertambangan emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

2) Menganalisis kemampuan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah dalam penyerapan logam berat merkuri (Hg) pada tanah bekas pertambangan emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini yaitu:

1) Mengembangkan studi literatur terkait potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah terhadap penyerapan logam berat merkuri (Hg) oleh tanaman *Melaleuca Cajuputi* di tanah bekas pertambangan emas rakyat.
2) Menambah publikasi ilmiah terkait potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), *Chitosan*, dan bahan pembenah tanah dalam menyediakan nutrien fosfor (P) bagi tanaman *Melaleuca Cajuputi* dalam meremediasi tanah bekas pertambangan emas rakyat.
3) Menjadi referensi dalam pemilihan metode remediasi di tanah bekas pengolahan tambang emas rakyat Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

1.5 Ruang Lingkup

Batasan ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

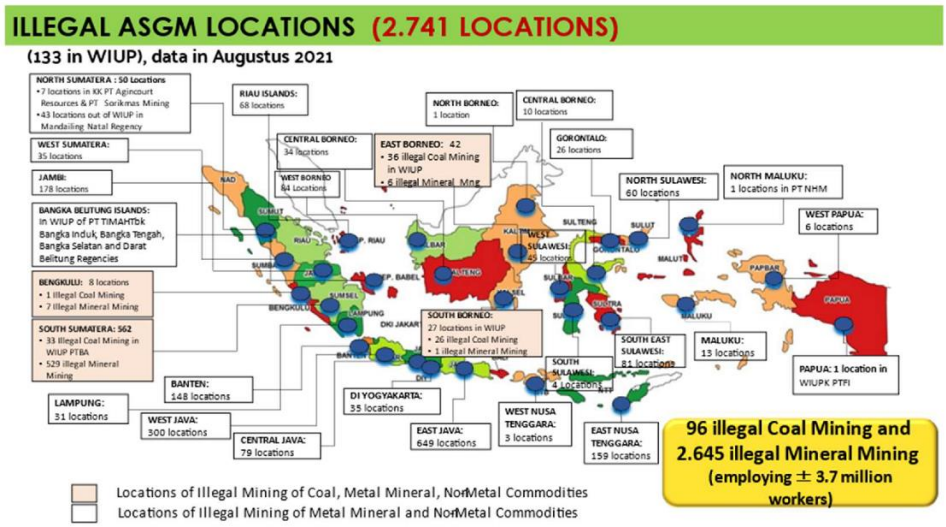
1) Penelitian dilaksanakan dari bulan April 2026 hingga September 2026.
2) Lokasi sampel tanah pasca-tambang berasal dari tambang emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.
3) Pengamatan tumbuh kembang tanaman uji dilakukan dalam skala rumah kaca.

.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pertambangan Emas di Indonesia

Salah satu industri mineral di Indonesia yang memberikan sumbangsih besar terhadap perekonomian Indonesia adalah industri pertambangan (Siregar dkk., 2021). Pertambangan adalah serangkaian kegiatan pencarian, penggalian, pengolahan, pemanfaatan, dan penjualan bahan galian berupa mineral, salah satunya emas (Novila & Puansah, 2024). Emas merupakan logam mulia dengan nilai jual tinggi sehingga menarik ketertarikan banyak orang untuk memanfaatkannya sebagai investasi jangka panjang (Wowling dkk., 2021). Dalam perspektif hukum, terdapat dua jenis pertambangan emas yakni pertambangan emas dengan izin dan pertambangan emas tanpa izin (PETI). Umumnya PETI dilakukan oleh masyarakat di sekitar area pertambangan dengan skala operasional yang kecil dan tersebar di seluruh Indonesia (Gambar 2.1). Hal ini juga dikenal sebagai *Illegal Artisanal and Small-Scale Gold Mining* (ASGM) atau Pertambangan Emas Skala Kecil (PESK) Ilegal.



Gambar 2.1 Lokasi Pertambangan Emas Skala Kecil Ilegal di Indonesia

(Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021)

Pertambangan jenis ini disebabkan oleh berbagai faktor ekonomi, termasuk minimnya lapangan pekerjaan dan tingkat ekonomi rendah yang mendorong masyarakat tetap berprofesi sebagai penambang liar yang lebih menjanjikan (Pratama, 2025). Pertambangan jenis ini tidak memiliki izin melakukan aktivitas pertambangan misalnya Izin Usaha Pertambangan (IUP) atau izin lain sesuai peraturan perundang-undangan berlaku. Hal ini

menjadikan penambang abai terhadap standar keselamatan dan lingkungan sehingga menyebabkan eksploitasi mineral secara berlebihan dan memicu kerusakan lingkungan yang lebih parah tanpa rencana pengendalian lebih lanjut.

2.1.1 Pertambangan Emas Tradisional

Penyumbang pencemaran terbesar dalam PETI adalah penggunaan metode tambang tradisional misalnya dengan metode amalgamasi dan sianidasi. Metode amalgamasi merupakan metode ekstraksi emas menggunakan merkuri, sedangkan sianidasi adalah metode ekstraksi emas menggunakan sianida. Sebagian besar pertambangan memilih menggunakan metode amalgamasi atau menambah merkuri dalam pengolahan bijih emas (Meutia dkk., 2022). Metode ini dipilih karena memiliki biaya operasional relatif rendah dibanding metode-metode lainnya meskipun memiliki risiko paling tinggi terhadap lingkungan.

Menurut Sumarjono (2020), pengolahan bijih emas dengan metode amalgamasi dilakukan dengan meremukkan (*crushing*) bijih emas yang terdapat dalam urat kuarsa. Dalam proses ini, penambang skala kecil biasanya menggunakan palu untuk meremukkan urat kuarsa hingga ukuran < 2 cm. Selanjutnya urat-urat tersebut akan dimasukkan ke dalam gelundung-gelundung dan dilakukan penggilingan (*grinding* dan *milling*). Penggilingan bertujuan untuk membebaskan mineral emas dari mineral pengotor sehingga proses ini dilakukan sampai ukuran butiran emas kurang dan lebih halus dari butiran pasir. Butiran ini kemudian diikat dengan merkuri dan membentuk amalgam di dalam gelundung. Pemisahan amalgam dengan mineral pengotor dilakukan dengan cara filtrasi menggunakan parasut. Untuk memisahkan merkuri dengan emas, dilakukan proses pemanggangan dalam *retort* (*retorting*). Setelah proses ini berakhir, emas berhasil diperoleh namun limbah yang mengandung merkuri juga turut dihasilkan. Perbandingan jumlah merkuri yang dibutuhkan untuk mengekstrak 1 gram emas adalah 1 gram merkuri, namun pada kenyataannya jumlah merkuri yang dimasukkan ke dalam gelundung jauh lebih besar dari jumlah yang dibutuhkan.

Pertambangan emas dengan metode tradisional biasanya dilakukan dalam skala rakyat. Demi keuntungan ekonomi jangka pendek, masyarakat sering abai terhadap aspek kesejahteraan lingkungan. Kurangnya pemantauan dan perizinan lingkungan turut memperparah sifat abai yang berujung pada eksploitasi tambang secara terus-menerus. Penggunaan ekstrak merkuri secara berlebihan akan menyebabkan merkuri

mudah masuk ke dalam air, tanah, hingga organisme yang ada di sekitar area pertambangan (Sari & Syamsussabri, 2024). Dampak lingkungan dari pertambangan emas tradisional juga mencakup degradasi lahan masif akibat penggalian terbuka tanpa adanya upaya reklamasi yang memadai (Pangemanan dkk., 2022). Kerusakan ini seringkali bersifat kumulatif sehingga proses remediasi sebaiknya diupayakan terlebih mempertimbangkan karakteristik tanah bekas tambang yang sudah tidak produktif lagi.

2.2 Karakteristik Tanah Bekas Tambang Emas

Tanah bekas tambang emas rakyat umumnya memiliki karakteristik yang sangat kontras dibandingkan dengan tanah hutan atau lahan pertanian normal. Lahan ini biasanya didominasi oleh material *tailing* yang merupakan sisa proses ekstraksi bijih emas yang telah kehilangan struktur tanah aslinya . Secara umum, tanah bekas tambang mengalami degradasi kualitas yang mencakup aspek fisik, kimia, dan biologis, sehingga memerlukan pembenah tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Pemahaman mendalam mengenai karakteristik ini sangat krusial dalam menentukan strategi rehabilitasi lahan yang efektif agar fungsi ekologis tanah dapat kembali pulih.

2.2.1 Fisika

Lahan bekas tambang emas mengalami permasalahan berupa tekstur tanah yang rusak dan aerasi tanah yang terganggu. Karakteristik fisik tanah bekas tambang emas ditandai dengan tekstur tanah tergolong kriteria lempung liat berpasir dan lempung berpasir dengan kandungan bahan organik sangat rendah sekitar 0,20-1,72% dibandingkan lahan hutan (Santi & Rezki, 2022). Tanah lempung memiliki pori-pori yang lebih kecil dan memiliki kemampuan untuk menyimpan air dalam jumlah yang besar. Namun, ketersediaan air ini sulit diserap oleh akar tanaman karena daya ikat partikel yang sangat kuat (Hura & Gulo, 2024). Kepadatan tanah atau *bulk density* pada lahan bekas tambang juga cenderung meningkat akibat penggunaan alat berat atau aktivitas manusia di area pertambangan.

2.2.2 Kimia

Secara kimiawi, tanah bekas tambang emas rakyat memiliki tingkat kesuburan yang sangat rendah karena hilangnya unsur hara makro dan mikro yang penting bagi tanaman. Kandungan bahan organik, nitrogen total, fosfor tersedia, dan kalium tersedia

biasanya berada pada level yang sangat rendah akibat hilangnya lapisan *topsoil*. Selain kemiskinan hara, masalah kimia utama pada lahan ini adalah adanya residu logam berat, terutama merkuri, yang dapat bersifat toksik bagi organisme tanah dan tanaman. Ketersediaan kandungan logam berat di tanah bekas tambang juga dapat dipengaruhi oleh *soil physico-chemical* seperti *soil organic matter* (SOM), distribusi partikel, pH, *electrical conductivity* (EC) and *cation exchange capacity* (CEC) (Coulibaly & Sako, 2024.).

2.2.3 Biologis

Karakteristik biologis tanah bekas tambang emas menunjukkan penurunan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah yang sangat drastis. Lingkungan yang ekstrem, miskin hara, dan tercemar logam berat menyebabkan mikroba fungsional seperti bakteri penambat nitrogen dan jamur mikoriza sulit untuk bertahan hidup (Du dkk., 2024). Rendahnya aktivitas biologis ini menghambat proses dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi alami, sehingga tanah kehilangan kemampuan untuk memulihkan kesuburannya secara mandiri. Kriteria tanah dengan kemampuan menahan air yang sangat rendah juga menyebabkan tanaman mudah mengalami kekeringan dan sulit bertahan hidup (Marbun dkk., 2025). Tanaman seringkali mengalami stres fisiologis akibat keracunan logam berat dan kekurangan air, yang menyebabkan kematian pada fase awal pertumbuhan. Data ini dapat diamati dari parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman, diameter batang, dan akumulasi biomassa pada jaringan tanaman.

2.3 Keberadaan Logam dan Unsur Hara di Tanah Tambang Emas

Logam adalah sebuah unsur kimia yang memiliki karakteristik keras, kuat, dan mampu menghantarkan listrik atau energi panas. Terdapat dua jenis logam yakni logam berat dan logam ringan. Logam berat merupakan unsur-unsur kimia dengan densitas lebih besar dari 5 gram/cm^3, mempunyai afinitas tinggi terhadap S, dan umumnya memiliki nomor atom 22 sampai 92 (Hatika, 2022). Logam ini memiliki ikatan kimia yang stabil dan cenderung sulit untuk terurai sehingga kerap menumpuk di lapisan tanah dan sedimen. Logam berat juga terbagi dalam dua jenis yakni logam esensial dan non-esensial. Logam esensial adalah jenis logam yang dibutuhkan oleh makhluk hidup untuk pertumbuhan dan

perkembangannya, sedangkan logam non esensial umumnya tidak begitu dibutuhkan sehingga dilabeli sebagai logam beracun. Dalam tanah tambang, keberadaan logam berat yang sering ditemukan adalah logam non esensial seperti merkuri (Hg). Mekuri memiliki sifat toksik yang tinggi dan berbahaya bagi lingkungan dan sekitarnya.

Dalam menjaga kesuburan tanah terutama vegetasi yang ada di area tercemar aktivitas tambang, terdapat unsur-unsur hara yang harus senantiasa dipenuhi agar tanah dan tanaman tetap sehat. Unsur hara terbagi menjadi dua jenis yakni unsur hara makro dan unsur hara mikro. Unsur hara makro adalah unsur yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang besar (N, P, K) sebaliknya unsur mikro dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang kecil (Fe, Mn, Zn). Salah satu contoh unsur makro yang amat terpengaruh oleh aktivitas tambang adalah unsur hara fosfor (P).

2.3.1 Merkuri (Hg)

Merkuri (Hg) merupakan salah satu logam berat yang tergolong dalam logam berat tidak esensial atau beracun. Merkuri memiliki tiga bentuk utama dalam lingkungan berupa unsur Hg; garam Hg anorganik seperti Hg^{+} dan Hg^{2+}; serta Hg organik berupa metil merkuri dan dimetil merkuri (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022). Merkuri dapat ditemukan dalam bentuk cair yang dikenal sebagai air raksa. Air raksa kerap ditemukan dalam area pertambangan ilegal oleh rakyat dimana air raksa digunakan untuk menghasilkan amalgam dari proses amalgamasi emas dengan merkuri. Merkuri dapat digunakan untuk mengekstraksi emas karena perbedaan sifat fisiknya termasuk densitasnya. Emas memiliki densitas 19,3 gram/cm^3 dan merkuri densitasnya sebesar 13,6 gram/ cm^3 (Vedalya, 2024). Perbedaan ini menyebabkan emas berada di bawah merkuri sehingga dapat dipisahkan dengan pendulangan.

Permasalahan lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan merkuri adalah kompleksitas dampak yang ditimbulkan merkuri saat masuk ke dalam lingkungan. Merkuri dapat bergerak mengikuti siklus hidrologi dimana merkuri bebas bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya (Salam dkk., 2024). Air yang terpapar merkuri tidak layak untuk dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari karena sifatnya yang beracun. Pencemaran merkuri dapat menyebabkan matinya kehidupan air seperti ikan dan biota air lainnya; menurunkan produksi tanaman pangan; dan merusak peralatan yang dilalui air tersebut (Pantouw & Ahmad, 2022). Merkuri juga dapat mengendap di sedimen sungai yang berpotensi memiliki kontak dengan tanaman maupun mikroorganisme air.

Aktivitas bakteri air dapat merubah merkuri menjadi metil merkuri. Metil merkuri merupakan senyawa toksik yang terbentuk dari oksidasi Hg^0 menjadi Hg^{2+} kemudian menjadi CH_3Hg^+.

Senyawa ini menyebabkan komplikasi penyakit termasuk gangguan neurologis terhadap manusia. Manusia memperoleh senyawa ini melalui biomagnifikasi, dimana fenomena ini bermula dari biota air yang mengonsumsi makanan mengandung merkuri kemudian terakumulasi di tubuhnya hingga terakumulasi di tubuh manusia yang memakan biota tersebut. Merkuri akan merusak serangkaian jaringan dan organ di sistem saraf, ekskresi, pencernaan, hingga otak dan menyebabkan kematian. Pada ibu hamil, merkuri dapat meracuni janin dan mengakibatkan kecacatan yang serius pada anggota tubuh anak (Widianti dkk., 2024).

2.3.2 Fosfor (P)

Unsur hara fosfor merupakan unsur hara makro yang sangat penting dan esensial bagi pertumbuhan tanaman. Fosfor memengaruhi sekitar 0,2% dari bobot kering tanaman sehingga tanaman tidak akan tumbuh tanpa unsur ini. Fosfor berperan sebagai alat pengangkut peredaran energi tanaman yang didapatkan dari hasil fotosintesis, respirasi, dan metabolisme karbohidrat dalam bentuk ATP dan ADP (Maulidan & Putra, 2024). Ketersediaan fosfor pada tanah bekas tambang di Indonesia umumnya amat rendah sehingga memerlukan penambahan fosfor dari sumber lainnya seperti pemupukan. Gusmini (2024) menyatakan bahwa bahan pembenah organik seperti kompos dan pupuk kandang turut menyumbangkan asam-asam organik dan CO_2 hasil dekomposisi yang membantu melepaskan lebih banyak P terikat menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman.

Meskipun fosfor membawa dampak positif bagi tanaman dengan meningkatkan kandungan nutrisi yang dibutuhkan, fosfor dan bahan yang organik lainnya dapat meningkatkan mobilisasi logam berat. Mekanismenya terletak pada bahan organik terlarut (*dissolved organic matter*) yang dilepaskan kompos ke dalam larutan tanah. Logam berat seperti merkuri (Hg) bersifat mudah membentuk ikatan kovalen kuat dengan molekul organik terlarut. Ketika fosfor terdekomposisi, sebagian Hg yang semula terikat kuat pada mineral liat atau oksida logam di dalam tanah (bentuk tidak larut) berpindah dan membentuk kompleks organo-merkuri yang larut dalam air tanah (Chen dkk., 2023). Oleh karena itu, penyediaan fosfor maupun nutrisi tambahan lainnya

perlu diperhatikan dosis dan kombinasinya dengan agen remediasi lainnya agar potensi mobilisasi logam berat dapat dicegah.

2.4 Metode Remediasi Tanah Bekas Tambang Emas

Metode remediasi tanah terkontaminasi secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga pendekatan utama, yaitu metode fisik, kimia, dan biologis. Metode fisik melibatkan teknik seperti stabilisasi/solidifikasi, penggalian, dan pencucian tanah untuk membatasi mobilitas kontaminan atau memindahkannya ke lokasi yang lebih aman. Metode kimia menggunakan agen pengikat atau oksidator untuk mengubah sifat kimia logam berat agar menjadi kurang toksik atau lebih mudah dipisahkan dari media tanah. Meskipun efektif dalam waktu singkat, metode fisik dan kimia seringkali memerlukan biaya operasional yang tinggi dan berpotensi merusak struktur alami tanah jika tidak dikelola dengan hati-hati.

Pendekatan biologis, yang dikenal sebagai bioremediasi dan fitoremediasi, menawarkan solusi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk memulihkan lahan bekas tambang. Bioremediasi memanfaatkan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur untuk mendegradasi atau mengimobilisasi polutan di dalam tanah (Banerjee dkk., 2025). Sementara itu, fitoremediasi menggunakan tanaman tertentu yang memiliki kemampuan hiperakumulator untuk menyerap, menstabilkan, atau mendegradasi kontaminan logam berat melalui sistem perakarannya (Akbar dkk, 2026). Integrasi antara bioremediasi dan fitoremediasi seringkali memberikan hasil yang lebih optimal karena adanya sinergi antara mikroorganisme tanah dan tanaman dalam mempercepat proses pemulihan kualitas lingkungan.

2.4.1 Bioremediasi

Bioremediasi merupakan teknologi pemulihan lingkungan yang memanfaatkan aktivitas biologis organisme hidup untuk mengurangi konsentrasi atau toksisitas polutan di lahan terkontaminasi. Dalam konteks lahan bekas tambang emas, bioremediasi berfokus pada penggunaan agen biologis yang mampu mengimobilisasi logam berat sehingga tidak lagi tersedia secara hayati (*bioavailable*) bagi organisme lain (Banerjee, 2025). Agen biologis ini bekerja melalui berbagai mekanisme, seperti biosorpsi pada dinding sel, presipitasi kimia, atau transformasi enzimatik yang mengubah bentuk logam menjadi senyawa yang lebih stabil.

2.4.2 Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah teknik pembersihan lahan terkontaminasi dengan menggunakan tanaman hijau untuk menyerap, mengakumulasi, atau menstabilkan polutan logam berat di dalam tanah. Mekanisme utama fitoremediasi meliputi fitoekstraksi, di mana tanaman menyerap logam dan memindahkannya ke bagian tajuk, serta fitostabilisasi yang menahan logam di area perakaran agar tidak menyebar (Akbar dkk., 2026). Keberhasilan fitoremediasi sangat bergantung pada pemilihan spesies tanaman yang memiliki laju pertumbuhan cepat, biomassa tinggi, dan toleransi yang kuat terhadap kondisi ekstrem lahan bekas tambang (Daniswati dkk., 2026). Tanaman berkayu seringkali dipilih karena kemampuannya untuk bertahan hidup dalam jangka panjang dan menyediakan tutupan lahan yang permanen.

2.4.2.1 *Melaleuca Cajuputi*

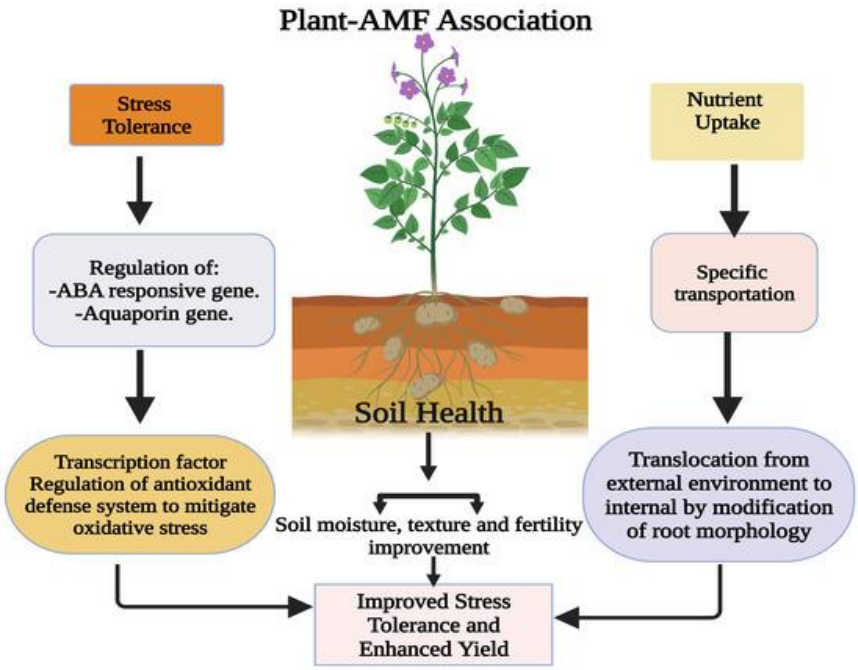
Melaleuca cajuputi atau kayu putih merupakan spesies tanaman asli Asia Tenggara yang dikenal memiliki daya adaptasi luar biasa terhadap tanah masam dan lahan marginal yang tergenang air. Tanaman ini telah diidentifikasi sebagai kandidat potensial untuk fitoremediasi karena kemampuannya dalam mengakumulasi logam berat tanpa mengalami kerusakan fisiologis yang signifikan (Daniswati dkk., 2026). Selain fungsinya sebagai agen remediasi, *Melaleuca cajuputi* memiliki nilai ekonomi tinggi melalui produksi minyak atsiri, sehingga memberikan insentif ekonomi bagi masyarakat dalam upaya reklamasi lahan bekas tambang (Juliarti dkk., 2022). Kombinasi *Melaleuca cajuputi* dengan *soil amelioran* diharapkan dapat mempercepat laju pertumbuhan dan efisiensi penyerapan logam pada lahan *tailing* emas (Mansur dkk., 2022).

2.4.3 Bahan Pembenah Tanah (*Soil Ameliorant*)

Bahan pembenah tanah (*soil ameliorant*) adalah bahan tambahan untuk dicampurkan ke dalam tanah dengan tujuan untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas tanah, sehingga dapat meningkatkan kesuburan secara keseluruhan (Hidayat dkk., 2025). Bahan ini dapat memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang terdegradasi. Berikut berbagai *soil ameliorant* yang digunakan dalam penelitian ini.

2.4.3.1 *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)

Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) adalah kelompok jamur tanah yang membentuk simbiosis mutualisme dengan sistem perakaran sebagian besar tanaman darat. AMF melindungi tanaman dari penyakit jamur dan meningkatkan penyerapan air dan unsur hara mineral dari tanah di sekitarnya (Gambar 2.2). Menurut Wahab dkk. (2023), AMF dapat berperan dalam upaya remediasi logam berat, melalui strategi imobilisasi senyawa logam, pengendapan partikel fosfat di dalam tanah, adsorpsi kitin di dalam dinding sel yang terbuat dari jamur, dan pengkelat logam berat di dalam AMF. Hifa AMF juga dapat berfungsi sebagai filter logam dalam tanaman dengan membungkus zat-zat yang berpotensi berbahaya dalam butiran polifosfat. Selain itu, AMF juga memperbaiki struktur tanah melalui produksi glomalin, sebuah glikoprotein yang membantu agregasi partikel tanah pada lahan bekas tambang yang terdegradasi (Banerjee dkk., 2025).



(Sumber: https://www.mdpi.com/2223-7747/12/17/3102)

Gambar 2.2 Peran *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) Terhadap Tanah dan Tanaman

2.4.3.2 *Chitosan*

Chitosan merupakan biopolimer alami yang diturunkan dari kitin, polisakarida terbanyak kedua di alam, yang banyak ditemukan pada limbah

cangkang udang dan krustasea lainnya dan memiliki potensi yang kuat untuk remediasi logam berat (Entoplast, 2025). Kitosan memiliki gugus fungsi amino (-NH_2) dan hidroksil (-OH) yang sangat reaktif, menjadikannya agen pengikat (*chelating agent*) yang sangat efektif untuk menyerap ion logam berat dari media tanah (Al-Mur, 2026). Dalam remediasi lahan tambang, *chitosan* bekerja dengan cara membentuk kompleks khelat yang stabil dengan logam seperti merkuri, sehingga menurunkan mobilitas dan toksisitas logam tersebut di lingkungan (Rahman dkk., 2023). Preparasi untuk memproduksi *chitosan* meliputi proses pencucian dan pengeringan; demineralisasi; pengeringan; deproteinisasi; penghilangan warna; hingga deaktilasi (Gambar 2.3).



(Sumber: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2431)

Gambar 2.3 Preparasi Pembuatan *Chitosan* Dengan Limbah Cangkang Udang

2.4.3.3 Pupuk Kompos

Kompos merupakan dekomposisi bahan-bahan organik atau proses perombakan senyawa yang kompleks menjadi senyawa sederhana dengan bantuan mikroorganisme (Hajar dkk., 2025). Kompos berfungsi untuk memperbaiki struktur tanah, tekstur tanah, aerasi, dan peningkatan daya resap tanah terhadap air. Untuk tanaman, penambahan kompos dapat menambahkan unsur hara yang dibutuhkan

oleh tanaman, misalnya unsur N, P, dan K. Kompos biasanya diproduksi dengan memanfaatkan bahan organik seperti sisa-sisa makanan, kotoran hewan, daun, dan sejenisnya. Pada kompos dari kotoran hewan seperti kambing, terdapat keunggulan khusus kompos jenis ini dimana kompos kohe kambing dapat meningkatkan aktivitas mikroba (Shu dkk., 2022). Pupuk kompos dari kohe kambing memiliki kandungan unsur hara dengan N sebesar 2,5%; unsur P sebesar 1,48%; dan C organik sebesar 15,39% (Suarmaprasetya & Soemarno, 2021).

2.4.3.4 Arang Sekam

Sekam padi merupakan limbah padi yang dulunya tidak dimanfaatkan oleh petani. Namun saat ini, sekam padi banyak dicari karena kemampuannya yang dapat dijadikan media tanam maupun campuran media tanam berbasis tanah (Waqfin dkk., 2023). Sekam padi dapat dimanfaatkan secara langsung atau dibakar terlebih dahulu (arang sekam). Arang sekam merupakan produk hasil pembakaran tidak sempurna dari sekam padi. Arang sekam memiliki keunggulan dibanding sekam padi tak terolah yakni mempunyai aerasi dan drainase yang baik dan bebas dari organisme patogen yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman (Gaso dkk., 2022). Secara kimia, arang sekam memiliki kandungan unsur hara penting seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) sehingga mampu menyuplai kebutuhan makronutrien hingga mikronutrien tanaman (Yasir dkk., 2026). Sebagai media tanam, arang sekam berperan dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan melindungi tanaman. Arang sekam dapat menahan air lebih lama dan membawa zat-zat organik yang dibutuhkan oleh tanaman (Fahruddin dkk., 2021).

2.5 Penelitian Terdahulu

Dalam pelaksanaan penelitian ini, penulis melakukan kajian terhadap penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian. Tujuan pengkajian ini adalah untuk mengetahui *research gap* antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan diadakan (Tabel 2.1). Berdasarkan hasil pengkajian, aplikasi AMF, *chitosan*, dan bahan pembenah tanah terhadap *Melaleuca Cajuputi* sebagai upaya bioremediasi tanah pasca tambang memiliki potensi besar untuk ditelusuri. Hal ini dapat meningkatkan kombinasi dan pilihan bervariatif dalam meremediasi tanah pasca aktivitas pertambangan emas.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Pratiwi dkk., (2021)	*Managing and Reforesting Degraded Post-Mining Landscape in Indonesia: A Review*	Jumlah AMF di tanah bekas tambang dengan reboisasi selama 10 tahun mencapai 492 spora per 20 g tanah, sedangkan di daerah yang tidak direboisasi, jumlahnya hanya 12 spora per 20 g tanah. Aplikasi AMF meningkatkan kandungan nutrisi tanah pasca tambang & mentolerir pasokan logam Hg.
2.	Al-Mur (2026)	*Application of shrimp shell-derived chitosan for heavy metal biosorption*	Studi ini menunjukkan bahwa kitosan yang berasal dari cangkang udang merupakan biosorben yang efisien dan berkelanjutan untuk menghilangkan ion $Pb2^{+}$ dan $Cu2^{+}$ dari larutan berair, dengan efisiensi penghilangan maksimum sebesar 93,0 ± 2,8% untuk $Pb2^{+}$ dan 89,5 ± 2,7% untuk $Cu2^{+}$ pada kondisi optimal (pH 7,5, 90 menit, 0,1 g/L per 50 mL).
3.	Daniswati dkk., (2026)	*Block compost for acid mine drainage remediation and as a growing medium for Melaleuca cajuputi seedlings*	Penggunaan kompos blok efektif dalam menaikkan pH media tanam dan menurunkan konsentrasi logam berat pada lahan bekas tambang. Kompos kohe kambing mengandung 1.41% N, 0.54% P, dan 0.75% K, meningkatkan tinggi tanaman setinggi 34 cm, daun sebanyak 23 buah daun, dengan *vitality* sebesar 100%.
4.	Mansur dkk. (2022)	*Cajeput (Melaleuca cajuputi) seedlings endurances to various media contaminated by acid mine drainage*	Bibit kayu putih (*Melaleuca cajuputi*) memiliki daya tahan yang tinggi sebesar 90% terhadap cekaman air asam tambang dan mampu tumbuh dengan baik pada media yang terkontaminasi jika didukung oleh nutrisi yang memadai.

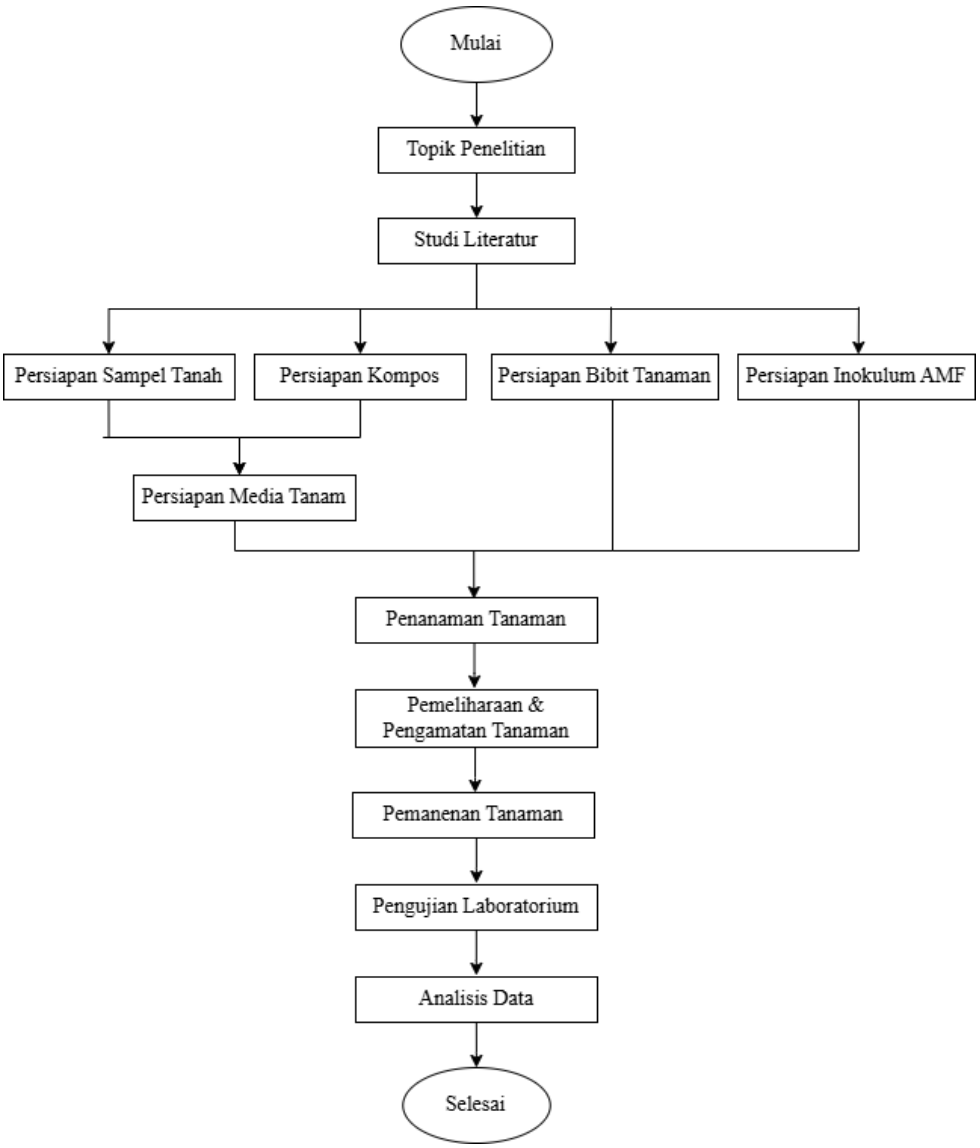
No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
5.	Suprianti dkk., (2025)	Pengaruh Arang Sekam Terhadap Pertumbuhan Bibit Kakao (*Theobroma Cacao L.*) Pada Tanah Pasca Tambang	Pencampuran arang sekam ke tanah pasca tambang mengandung unsur hara N sebesar 215 mg/kg. Pemberian arang sekam sebanyak 350 gram/*polybag* meningkatkan pH tanah sehingga berpengaruh pada peningkatan pertumbuhan bibit kakao pada tanah pasca tambang.

Berdasarkan tabel di atas, penelitian terdahulu telah mengkaji komponen-komponen remediasi tanah bekas tambang secara terpisah: AMF terbukti meningkatkan nutrisi tanah dan toleransi Hg pada lanskap pasca tambang yang direboisasi (Pratiwi dkk., 2021), *chitosan* terbukti efektif sebagai biosorben logam berat pada sistem larutan berair (Al-Mur, 2026), dan bahan pembenah tanah seperti kompos serta arang sekam terbukti memperbaiki pH dan mendukung pertumbuhan bibit pada tanah pasca tambang (Daniswati dkk., 2026; Suprianti dkk., 2025). *Melaleuca cajuputi* sendiri telah dibuktikan tahan terhadap cekaman air asam tambang (Mansur dkk., 2022). Berbagai penelitian serupa juga telah mengulas mengenai kemampuan *melaleuca cajuputi*, *chitosan*, bahkan AMF. Meskipun demikian, seluruh penelitian tersebut menguji setiap agen secara parsial dan pada konteks yang berbeda-beda, sehingga belum ditemukan penelitian yang mengombinasikan AMF, *chitosan*, dan bahan pembenah tanah (kompos dan arang sekam) secara bersamaan pada *Melaleuca cajuputi* sebagai agen remediasi tanah bekas tambang emas rakyat yang terkontaminasi Hg. Oleh karena itu, kesenjangan (*research gap*) ini yang penulis upayakan dapat dijawab oleh penelitian ini.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

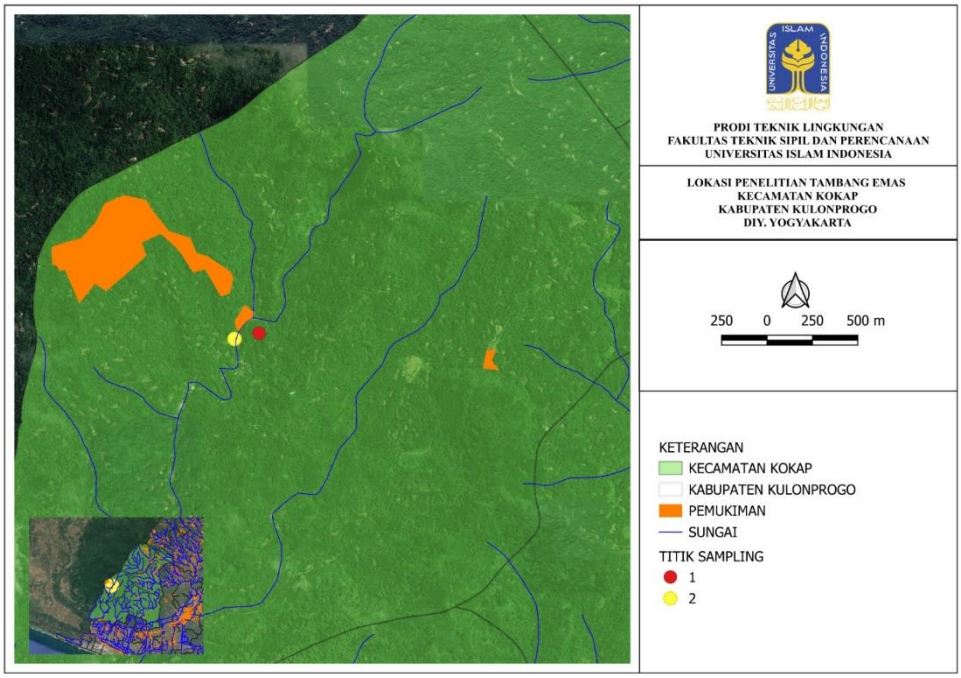
Prosedur penelitian ini dapat diamati dalam diagram alir yang dimuat dalam Gambar 3.1 di bawah ini dengan dokumentasi terlampir pada Lampiran 4.



Gambar 3.1 Diagram Alir Prosedur Penelitian

3.1.1 Persiapan Sampel Tanah

Sampel tanah diperoleh dari lahan bekas pengolahan tambang emas rakyat di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pengambilan sampel tanah menggunakan metode *grab sampling*. Metode *grab sampling* adalah metode pengambilan sampel yang diambil langsung dari suatu titik penelitian. Proses pengambilan sampel dilakukan dengan cara mencangkul tanah hingga kedalaman ± 10-30 cm sehingga menjadikan sampel termasuk *disturbed sample* (Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Peta Lokasi Titik Sampling

Titik *sampling* terdiri dari dua titik tepatnya di koordinat 7°49'37.9"S 110°04'15.6"E untuk titik pertama dan 7°49'38.9"S 110°04'11.2"E untuk titik kedua. Perbedaan kedua titik ini berada pada kondisi lingkungan sekitar titik. Titik pertama berdekatan dengan peternakan kambing dan kebun warga, sedangkan titik kedua berada di lahan yang didominasi semak-semak dan berjarak ± 15 meter dari tepi sungai. Sampel diambil sebanyak 130,3 kg. Tanah tersebut kemudian melalui proses sterilisasi di *green house* dengan menggunakan metode penguapan/kukus konvensional selama lima jam. Penguapan dilakukan dalam drum besi yang diberikan penyangga besi untuk

memisahkan sampel dengan air di dasar drum. Sampel tanah dibungkus menggunakan plastik agar kandungan kimia esensial dapat diperangkap di dalam plastik. Pemanasan dilakukan dengan bantuan gas LPG (*liquefied petroleum gas*) dan pasokan air untuk memastikan penguapan berlangsung selama durasi pemanasan. Sterilisasi dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan populasi mikroba tanpa mengubah sifat fisik dan kimia tanah (Querejeta, 2023). Sterilisasi metode uap konvensional diketahui mampu mempertahankan bahkan meningkatkan karakteristik fisik tanah seperti pH, kadar air, dan kandungan fosfor tersedia (Dietrich dkk., 2020). Setelah itu, tanah berupa lempung dihaluskan menjadi butiran pasir yang tidak menggumpal dengan cara ditumbuk dan digerus menggunakan palu kemudian disimpan di wadah steril. Saat pertama kali diukur, pH tanah ini menunjukkan tingkat keasaman yang tinggi yakni sebesar 3,11.

3.1.2 Persiapan Kompos & Arang Sekam

Kompos yang digunakan berasal dari kohe kambing yang telah diolah sehingga siap digunakan. Adapun arang sekam yang digunakan berasal dari komersil. Sebelum dipakai, kompos dan arang sekam ini disterilisasi juga menggunakan metode yang sama dengan sterilisasi tanah selama lima jam. Sama dengan pernyataan Querejeta (2023), tujuan sterilisasi adalah untuk menghilangkan bakteri patogen yang hidup, dalam hal ini yakni bakteri yang terdapat di dalam kompos dan arang sekam. Penambahan kedua bahan ini bertujuan untuk memasok keperluan nutrien tanaman sembari memperbaiki struktur tanah tambang yang lempung agar lebih gembur, pori-porinya terbuka, dan mudah untuk dihidupi tanaman.

3.1.3 Persiapan Inokulum Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)

Inokulum AMF berperan sebagai agen biologis yang membantu pertumbuhan tanaman melalui akar tanaman. Inokulum AMF diperoleh dari tanaman sorgum dan media tanam zeolit. Jenis AMF yang digunakan adalah *Glomus* sp. yang didapatkan dari tanah bekas tambang batu bara. Pemanenan AMF dilakukan dengan memisahkan tanaman dengan media zeolit, kemudian

media zeolit disimpan dalam plastik kedap udara. Penambahan AMF di media tanam berbentuk media zeolit yang telah dipersiapkan dengan berat sebanyak 25 gram.

3.1.4 Persiapan Media Tanam

Media tanam yang digunakan merupakan kombinasi dari AMF, *chitosan*, kompos, dan sekam padi. AMF didapatkan dari kultur pribadi di *green house* sedangkan *chitosan*, kompos, dan sekam padi didapatkan dari komersil. Jenis *chitosan* yang digunakan adalah *shrimp shell chitosan* dengan karakteristiknya yang dapat diamati dalam Tabel 3.1.

Tahapan persiapan media tanam dibagi menjadi dua tahap yakni *land farming* dan persiapan di *poly bag.* Pada tahapan *land farming*, sampel tanah sebanyak 5 kg ditambahkan kompos sebanyak 5% (250 gram) dan *chitosan* sebesar 0,5% (12,5 gram). Mulanya sampel tanah, *chitosan*, dan kompos dicampurkan di dalam satu wadah reaktor dan dirawat selama dua bulan guna menjaga kandungan tetap aktif. Pada tahapan persiapan media tanam di *poly bag*, tanah *land farming* digunakan sebanyak 475 gram dengan penambahan arang sekam sebanyak 5% dari 500 gram (25 gram) dan AMF sebanyak 25 gram. Perlakuan masing-masing sampel dapat diamati dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Karakteristik *Shrimp Shell Chitosan*

Parameter	***Result***
Colour/Appearance	*White*
Particle Size	*Powder Mesh* 100-200
Moisture Regain	9,45%
Residue of Ignition	1,05%
Degree of Deacetylation	96,44%
Viscocity	105.10 mPas
Molecular Weight	4 KDa
Proteint Content	<0,2%
Heavy Metals	<3 ppm
Micro Organism	*Negative*

Sumber: Chimultiguna, 2025

Tabel 3.2 Perlakuan Sampel Uji

No.	Perlakuan	Kode Tanaman	Keterangan
1.	P1	*Soil* + *Compost*	*Soil* (475 gram) + *compost* (250 gram) + arang sekam (25 gram)
2.	P2	*Soil* + *Compost* + *Chitosan*	*Soil* (475 gram) + *compost* (250 gram) + *chitosan* (12,5 gram) + arang sekam (25 gram)
3.	P3	*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF	*Soil* (475 gram) + *compost* (250 gram) + *chitosan* (12,5 gram) + arang sekam (25 gram) + AMF (25 gram)

3.1.5 Penanaman Tanaman

Penanaman dilakukan pada pagi hari guna mempertahankan suhu udara dan kelembapan tanah yang optimal. Tanaman yang digunakan adalah tanaman kayu putih (*Melaleuca Cajuputi*) yang memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap lingkungan yang ekstrem. Sampel dibagi menjadi tiga kelompok perlakuan sesuai Tabel 3.2. Mulanya bahan-bahan ditimbang sesuai berat yang ingin digunakan kemudian dicampurkan di dalam satu wadah. Selanjutnya tanaman kayu putih diambil dari *polybag*-nya dengan hati-hati agar tidak ada akar yang terputus. Sebelum ditanam di tanah bekas tambang, tanaman dilapisi dengan tanah hutan yang berasal dari *polybag* asalnya untuk meminimalisir stres tanaman terhadap tanah bekas tambang.

3.1.6 Pemeliharaan & Pengamatan Tanaman

Kegiatan pemeliharaan dikerjakan melalui penyiraman tanaman setiap hari, baik pada pagi hari atau sore hari. Banyaknya penyiraman disesuaikan dengan kondisi kelembapan tanah dan cuaca di hari penyiraman. Pada bulan Desember 2025 hingga Januari 2026, tanaman disiram setiap hari untuk memenuhi kebutuhan air di musim kemarau. Sedangkan pada bulan Februari hingga April 2026, tanaman disiram beberapa sekali dikarenakan musim hujan yang menyebabkan potensi tumbuhnya jamur sangat tinggi. Tanaman juga beberapa kali disemprotkan

insektida untuk mengontrol *insect* agar tidak hidup dan menganggu pertumbuhan tanaman. Pengamatan tanaman dilakukan dengan cara mengukur tinggi dan diameter tanaman setiap 2 minggu sekali. Tinggi tanaman diukur dari permukaan tanah hingga ke batang teratas tanaman menggunakan meteran, sedangkan diameter tanaman diukur ± 1 cm dari permukaan tanah menggunakan *digital caliper*.

3.1.7 Pemanenan Tanah & Tanaman

Pemanenan tanaman diadakan saat usia tanaman telah mencapai ± 4 bulan. Durasi ini ditentukan agar AMF dapat tumbuh berkembang mencapai potensi paling optimal. Pemanenan dilakukan untuk tanah dan jaringan tanaman. Tanah dipanen dengan cara mencampurkan tanah setiap ulangan dalam satu kelompok perlakuan agar menjadi homogen. Jaringan tanaman dengan cara memisahkan antara jaringan atas dan jaringan bawah. Jaringan atas meliputi daun dan batang tanaman, adapun jaringan bawah meliputi akar tanaman termasuk sampel tanah. Setelah dipisah, masing-masing jaringan dicuci hingga bersih dan dikeringkan. Berikutnya pengukruran biomassa tanaman dilakukan dengan cara menimbang berat basah dan berat kering tiap jaringan. Berat basah diukur dengan menggunakan timbangan analitik. Jaringan yang telah ditimbang disimpan dalam wadah berupa amplop untuk menjaga kondisi tanaman tetap optimal. Untuk berat kering, jaringan tanaman dibagi menjadi dua kelompok dan dioven selama 72 jam pada suhu 70^{o}C. Setelah itu, jaringan ditimbang kembali dengan timbangan analitik dan dipersiapkan untuk pengujian.

3.1.8 Pengujian Laboratorium & Analisis Data

Pengujian laboratorium dilakukan untuk menganalisis kandungan logam merkuri (Hg) dan nutrien fosfor (P) (Tabel 3.3). Analisis ini penting untuk mengetahui efektivitas remediasi tanaman dan agen biologis yang ditambahkan. Uji kandungan logam Hg mengacu pada SNI 8910:2021 mengenai cara uji kadar 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). Alat yang digunakan untuk uji Hg adalah *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). ICP-MS

dapat mendeteksi ion logam berdasarkan massanya dengan ketelitian yang tinggi dalam satuan *parts-per-billion* (ppb) atau *parts-per-trilion* (ppt).

Untuk uji nutrien fosfor mengacu pada Petunjuk Teknis Edisi 3 Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk 2023 yang diterbitkan oleh Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Pengujian nutrien fosfor menggunakan metode Bray I untuk sampel tanah, sedangkan pada sampel jaringan tanaman digunakan metode Penetapan Ekstrak HCl 25%. Pembacaan P menggunakan alat spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis). Alat ini bekerja dengan melibatkan paparan cahaya dengan panjang gelombang yang telah diketahui melalui suatu larutan dan diukur konsentrasi larutan menggunakan absorbansinya. Panjang gelombang yang digunakan untuk pengujian P adalah 889 nm. Pengujian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Kualitas Lingkungan Jurusan Teknik Lingkungan UII.

Tabel 3.3 Parameter & Metode Uji

No.	Parameter Uji	Metode Uji	Acuan Uji
1.	Logam Merkuri (Hg)	Destruksi asam & pengujian menggunakan ICP-MS	SNI 8910:2021
2.	Nutrien Fosfor (P)	Bray I dan Penetapan P Ekstrak HCl 25%	Petunjuk Teknis Edisi 3 Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk 2023

3.2 Pengumpulan Data

3.2.1 Data/Variabel/Parameter

Data yang diambil terbagi dalam dua jenis data yaitu data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data tinggi dan diameter tanaman; jaringan tanaman pasca pemanenan; kondisi media tanam; hasil uji laboratorium; dan terutama karakterisasi *chitosan* melalui uji XRD (*X-Ray Diffraction*). Sebagian besar data dimuat dalam Bab IV. Berdasarkan hasil uji XRD (Lampiran 3), material *chitosan* yang digunakan termasuk semi-

kristalin dengan dua puncak karakteristik pada 2θ adalah 6,20° dan 19,99°, di mana kristalinitasnya yang relatif rendah dan konsisten dengan *chitosan* berderajat deasetilasi tinggi (96,44%). Kemudian untuk data sekunder, data diperoleh melalui studi literatur terhadap artikel/jurnal/publikasi ilmiah sejenisnya yang sejalan dengan topik penelitian.

3.2.2 Waktu dan Lokasi

Penelitian diadakan dalam kurun waktu ± 6 bulan. Lokasi pengambilan sampel tanah bekas pengolahan tambang emas berada di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (Gambar 3.2). Adapun lokasi penelitian rumah kaca berada di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Penelitian di rumah kaca meliputi persiapan media tanam, penanaman, pemeliharaan dan pengamatan, hingga pemanenan tanaman dilakukan di rumah kaca. Persiapan media tanam/*land farming* dilaksanakan selama 51 hari yakni dari tanggal 19 Oktober hingga 9 Desember 2025. Penanaman tanaman menuju media tanam dilakukan dalam satu pekan (9-12 Desember 2025) dengan pemantauan serta pemeliharaan tanaman ± 4 bulan (13 Desember 2025 sampai dengan 12 April 2026). Pemanenan tanah dan jaringan tanaman dilakukan pada tanggal 18 April 2026.

3.2.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat diamati dalam Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 sebagai berikut.

Tabel 3.4 Alat Penelitian

No.	Nama Alat	Keterangan
1.	Autoklaf	Untuk mensterilisasi alat dan bahan
2.	*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS)	Untuk menguji kandungan logam Hg di dalam sampel
3.	Amplop coklat	Untuk menyimpan jaringan akar dan batang tanaman

4.	Corong kaca	Untuk meletakan kertas saring
5.	*Digital caliper*	Untuk mengukur diameter batang tanaman
6.	Gelas *beaker* 250 ml	Sebagai wadah destruksi sampel
7.	Gelas ukur 250 ml	Untuk mengukur larutan yang digunakan
8.	Kaca arloji	Sebagai wadah menimbang sampel dan bahan
9.	Kertas saring	Untuk menyaring larutan/sampel hasil destruksi
10.	Labu *erlenmeyer* 250 ml	Untuk mencampur atau mewadahi larutan
11.	*Magnetic stirrer*	Untuk menghomogenkan larutan
12.	*Measuring tape*	Untuk mengukur tinggi batang tanaman
13.	Oven	Untuk menghilangkan kadar air sampel
14.	*Polybag* 15 × 15 cm	Sebagai wadah penanaman tanaman
15.	Rak tabung reaksi	Untuk meletakkan tabung reaksi
16.	Spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis)	Untuk menguji kandungan nutrien P di dalam sampel
17.	Tabung reaksi	Untuk menampung larutan sebelum diuji
18.	Timbangan analitik	Untuk menimbang berat basah dan berat kering sampel/tanaman uji
19.	Timbangan digital	Untuk menimbang bahan yang digunakan
20.	Plastik *ziplock*	Untuk menyimpan sampel tanah setelah dihaluskan

Tabel 3.5 Bahan Penelitian

No.	Nama Bahan	Keterangan
1.	Arang sekam	Sebagai bahan penggembur tanah dan pelengkap mikronutrien
2.	*Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)	Sebagai agen biologis remediasi tanah
3.	*Melaleuca Cajuputi*	Sebagai vegetasi tanaman uji
4.	Pupuk kompos	Sebagai pelengkap makronutrien untuk tanaman uji
5.	*Shrimp Shell Chitosan*	Sebagai agen biologis remediasi tanah
6.	Tanah bekas pengelolaan tambang emas	Sebagai media tanam uji

3.3 Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan setiap kelompok perlakuan. Pengujian dilakukan dengan mengukur kadar logam Hg dan nutrien P yang terdapat di tanah, batang, dan akar tanaman. Sedangkan untuk pertumbuhan tanaman, pertumbuhan diameter, tinggi, dan biomassa tiap kelompok tanaman akan dibandingkan satu sama lain. Untuk logam Hg, sampel didestruksi menggunakan asam sesuai acuan SNI 8910-2021 dan dibaca menggunakan alat ICP-MS kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut (Contoh perhitungan terlampir di Lampiran 2).

$$\text{Kadar logam } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{C} \times \text{V}}{\text{W} \times \text{P}} \times \text{fp}$$

(Sumber: SNI 8910-2021)

Keterangan:

C = konsentrasi contoh uji yang didapat dari ICP-MS (mg/L);

V = volume akhir setelah proses destruksi (mL);

W = berat contoh uji (g);

fp = faktor pengenceran;

P = fraksi padat.

Selanjutnya untuk nutrien P, banyaknya ulangan perlakuan sama seperti sampel saat uji Hg. Metode yang digunakan adalah Bray I dan Penetapan P Ekstrak HCl 25%. Metode Bray I digunakan untuk menentukan kadar P tersedia di dalam tanah. Adapun metode Penetapan P Ekstrak HCl 25% ditujukan untuk mengetahui kadar P total dalam jaringan tanaman (batang & akar). Kadar P tersebut dihitung menggunakan persamaan di bawah ini dengan contoh perhitungan dapat diamati dalam Lampiran 2.

a. Persamaan Bray I:

$$\text{Kadar P Tersedia (ppm)} = \text{ppm kurva} \times \left(\frac{\text{ml ekstrak}}{1.000\ \text{ml}}\right) \times \left(\frac{1000\ \text{g}}{\text{g contoh}}\right) \times \text{fp} \times \left(\frac{142}{190}\right) \times \text{fk}$$

(Sumber: Petunjuk Teknis Edisi 3 Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk 2023)

b.Persamaan Penetapan P Ekstrak HCl 25%:

$$\text{Kadar P Potensial } \left(\frac{\text{mg}}{100\text{gr}}\right) = \text{ppm kurva} \times \left(\frac{\text{ml ekstrak}}{1.000\ \text{ml}}\right) \times \left(\frac{100\ \text{g}}{\text{g contoh}}\right) \times \text{fp} \times \left(\frac{142}{190}\right) \times \text{fk}$$

(Sumber: Petunjuk Teknis Edisi 3 Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk 2023)

Keterangan:

ppm kurva = kadar contoh yang didapat dari kurva hubungan antara kadar deret standar dengan pembacaannya setelah dikoreksi blanko;

fk = faktor koreksi kadar air = 100/(100− % kadar air)

fp = faktor pengenceran (20)

142/190 = faktor konversi bentuk PO_4 menjadi P_2O_5

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap pH

Tanah bekas tambang emas yang diteliti dalam penelitian ini memiliki berbagai permasalahan baik dari segi fisik maupun kimia. Tanah yang diperoleh memiliki tekstur lempung dan keras. Tanah ini memiliki pori-pori yang kecil atau

bisa diartikan tingkat kompaksinya tergolong tinggi dengan pH yang sangat rendah. Pemberian kombinasi AMF, *chitosan*, dan bahan pembenah tanah seperti kompos dan arang sekam diketahui dapat meningkatkan karakteristik fisik dan kimia tanah (pH tanah).

pH (*potential of Hydrogen*) tanah merupakan parameter fundamental yang memengaruhi berbagai sifat dan proses tanah, termasuk siklus nutrisi, aktivitas mikroba, dekomposisi bahan organik, ketersediaan dan spesiai logam, serta keseimbangan karbon organik (Mosley dkk., 2024). Jenis pH tanah terbagi menjadi dua sesuai dengan metode pengujiannya yaitu pH H_2O dan pH KCl, di mana pada penelitian ini jenis pH yang digunakan adalah pH H_2O. Berdasarkan acuan yang berlaku, pH tanah H_2O yang netral umumnya berada sekitar 5,5 hingga 7,5 (Tabel 4.1).

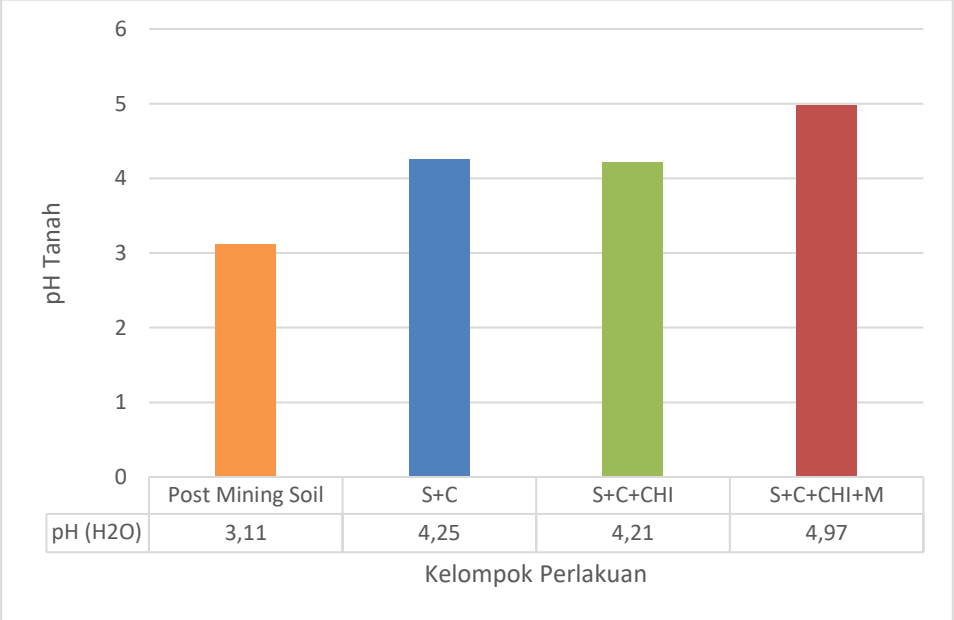
Tabel 4.1 Baku Mutu pH Tanah H_2O

pH H_2O	**Kategori**
<4,5	Sangat Rendah
4,5-5,5	Rendah
5,5-7,5	Sedang
7,5-8,0	Tinggi
>8	Sangat Tinggi

Sumber: Pusat Penelitian Tanah, 1983

Dalam penelitian ini, tanah bekas tambang emas tanpa perlakuan (*post mining soil*) memiliki pH sangat rendah yakni 3,11. Setelah diberi perlakuan dengan kombinasi AMF, *chitosan*, dan kompos serta arang sekam, pH tanah perlahan membaik. pH pada perlakuan S+C (4,25) dan S+C+CHI (4,21) menunjukkan peningkatan cenderung moderat yang mengindikasikan bahwa penambahan kedua agen dapat meningkatkan pH tanah, meskipun peningkatannya relatif setara (Gambar 4.1). Hal ini menandakan bahwaa pemberian *chitosan* pada perlakuan S+C+CHI tidak memberikan kontribusi tambahan yang berarti bagi perbaikan pH dibandingkan perlakuan dengan tambahan kompos saja (S+C). Peningkatan pH pada kedua perlakuan utamanya didorong oleh dekomposisi bahan organik kompos yang melepaskan ion hidroksil (OH^-) dan asam-asam organik yang mengompleks

H^+ bebas di larutan tanah sehingga menurunkan tingkat kemasaman total (Gusmini dkk., 2024). Sebaliknya pada kombinasi S+C+CHI+M, terdapat peningkatan pH yang jauh lebih tinggi dan signifikan mencapai 4,97 dibandingkan pH awal dan melampaui kedua perlakuan lainnya. Peningkatan ini konsisten dengan peran AMF dalam yang menghasilkan asam-asam organik dan glomalin di mana glomalin berperan ganda melalui pengikatan ion logam sekaligus turut memperbaiki keasaman tanah secara keseluruhan (Fall dkk., 2022).



Gambar 4.1 Grafik pH Tanah Pra dan Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, serta AMF

*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

4.2 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap Logam Merkuri (Hg)

4.2.1 Kadar Hg dalam Tanah

Merkuri (Hg) merupakan logam non esensial yang pada tingkat tertentu dapat menjadi toksik bagi makhluk hidup. Tanah bekas pengolahan tambang emas berkaitan erat dengan penggunaan merkuri. Hal ini disebabkan oleh proses ekstraksi emas dengan metode amalgamasi yang menggunakan merkuri di dalamnya. Kontaminasi logam berat di lingkungan dapat

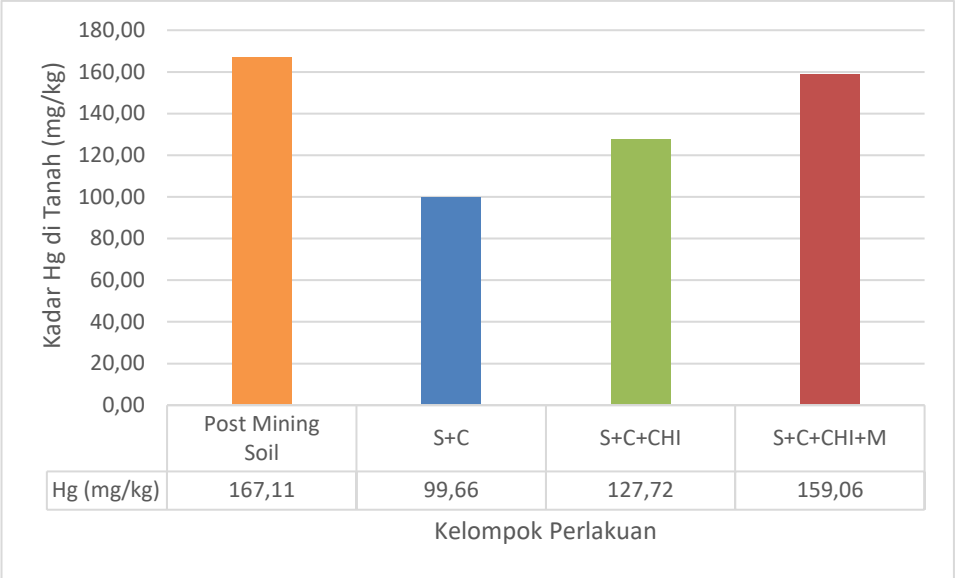
menurunkan kualitas di area sekitar lokasi pencemaran. Berdasarkan regulasi berlaku, kandungan merkuri normal pada tanah berkisar dari 0,01-0,3 mg/kg, sedangkan konsentrasi kritis berkisar dari 0,3-0,5 mg/kg (Tabel 4.2).

Tabel 4.2 Standar Kandungan Logam Berat Merkuri pada Tanah

Logam	Kisaran normal (mg/kg)	Konsentrasi kritis (mg/kg)
Merkuri (Hg)	0,01-0,3	0,3-0,5

Sumber: Alloway, 1995

Data kadar Hg di tanah menunjukkan tanah bekas tambang tanpa perlakuan apapun (*post mining soil*) mencatat kadar Hg tanah tertinggi (167,11 mg/kg), diikuti perlakuan S+C+CHI+M (159,06 mg/kg), selanjutnya S+C+CHI (127,72 mg/kg), dan S+C dengan kadar Hg tanah terendah (99,66 mg/kg) (Gambar 4.2). Pada perlakuan S+C, kadar Hg tanah tercatat paling rendah karena kompos meningkatkan kandungan bahan organik dan mengubah pH tanah, yang secara tidak sengaja memobilisasi merkuri dan membuatnya sangat tersedia secara hayati (*bioavailable*) bagi tanaman (Collazo dkk., 2026). Hal ini disebabkan oleh kesamaan struktural antara logam berat seperti Hg dengan nutrisi esensial sehingga Hg bisa memasuki tanaman melalui akar, sama seperti jalur transportasi nutrisi menuju tanaman (Manoj dkk., 2020). Tanpa kehadiran AMF yang berfungsi sebagai filter biologis atau *chitosan* sebagai agen pengikat logam, Hg yang termobilisasi ini diserap secara bebas oleh akar tanaman pada perlakuan S+C.



*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

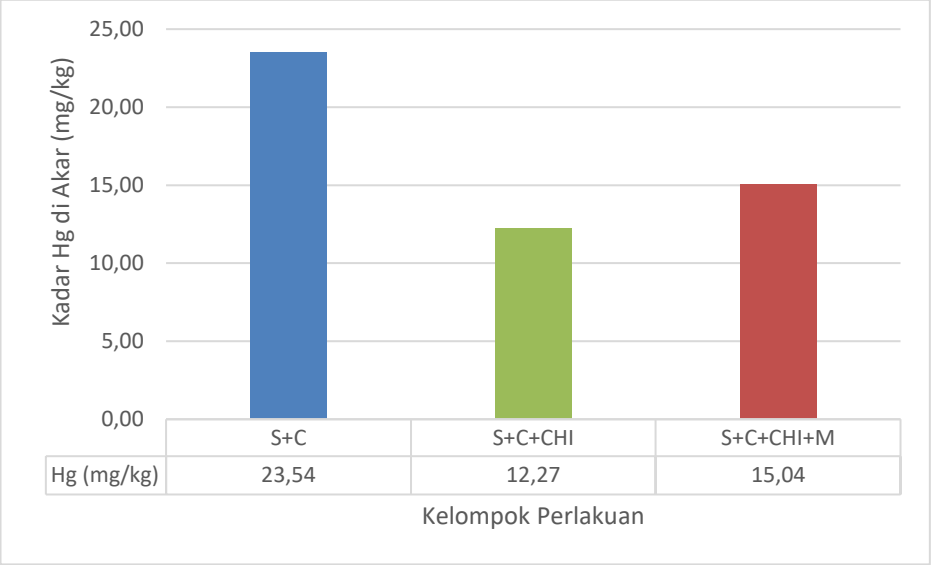
Gambar 4.2 Grafik Kadar Hg dalam Tanah Pra dan Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, serta AMF

Sebaliknya, kombinasi S+C+CHI dan S+C+CHI+M meninggalkan Hg dalam jumlah terbanyak di dalam tanah. Pada kombinasi S+C+CHI, gugus amina (-NH_2) dan hidroksil (-OH) pada rantai *chitosan* mengikat ion Hg^{2+} dan membentuk kompleks yang lebih stabil sehingga logam tadinya berada dalam bentuk mudah lepas (*exchangeable*/*available fraction*) dikonversi menjadi bentuk yang lebih sulit diakses (*less accessible fraction*). (Goci dkk., 2023). Pada perlakuan S+C+CHI+M, miselium AMF secara efektif mengikat dan mengimobilisasi logam berat pada hifa ekstraradikal dan glomalin. Glomalin merupakan sebuah glikoprotein yang memiliki kapasitas mengikat logam berat secara ekstraselular di zona rizosfer sebelum logam tersebut sempat diserap oleh akar (Boorboori & Zhang, 2022). Selain itu, gugus amina dan hidroksil pada *chitosan* memiliki afinitas tinggi untuk mengikat ion logam seperti Hg^{2+}, membentuk kompleks yang relatif stabil dan kurang *mobile* di dalam larutan tanah (Wang dkk., 2024). Meski demikian, dari perspektif fitoekstraksi murni, retensi Hg yang tinggi di tanah menunjukkan bahwa logam tidak berhasil dipindahkan ke bagian tanaman yang dapat dipanen.

4.2.2 Kadar Hg dalam Jaringan Tanaman

Merkuri (Hg) dapat masuk ke dalam jaringan tanaman melalui mekanisme pertukaran ion (*ion exchange*). Dinding sel akar tersusun dari polisakarida seperti pektin, selulosa, dan hemiselulosa yang kaya akan gugus fungsional bermuatan negatif. Muatan negatif ini secara alami menarik dan mengikat kation-kation bermuatan positif dari larutan tanah termasuk Hg. Ketika ion Hg^{2+} berada di larutan tanah dekat permukaan akar, ia dapat menggantikan kation-kation yang sebelumnya sudah terikat pada akar tanaman.

Data Hg pada jaringan akar tanaman menunjukkan pola yang berbeda dengan pola Hg tanah. Jika diurutkan dari kadar Hg yang tertinggi, maka kombinasi S+C menempati urutan pertama (23,54 mg/kg), diikuti S+C+CHI+M (15,04 mg/kg), dan diakhiri oleh S+C+CHI yang mencatat kadar Hg akar terendah (12,27 mg/kg) (Gambar 4.3). Perlakuan S+C menyerap Hg tertinggi (23,54 mg/kg) dikarenakan mobilisasi Hg secara bebas akibat perubahan pH dan penambahan bahan organik dari kompos yang diserap langsung oleh akar tanpa hambatan biologis apapun (Collazo dkk., 2026).

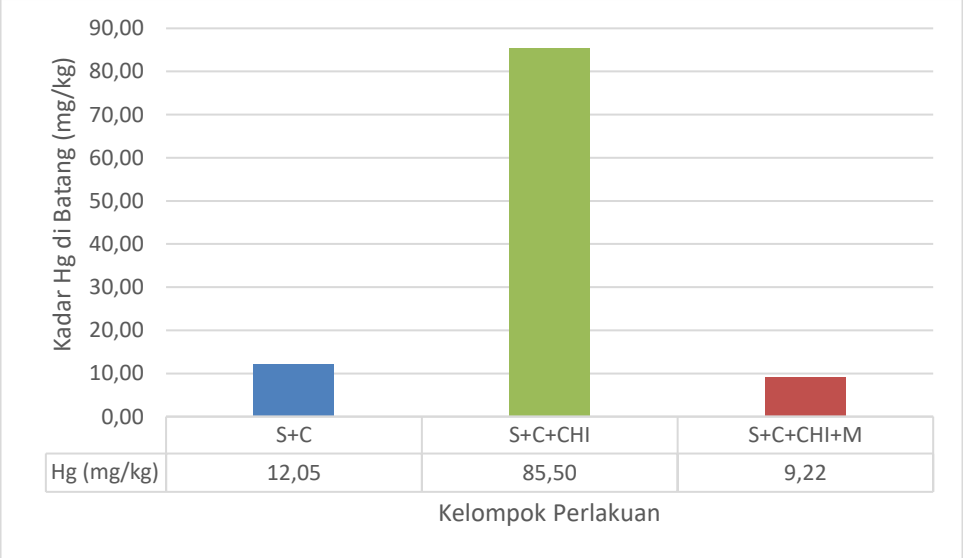


*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

Gambar 4.3 Grafik Kadar Hg dalam Akar Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF

Pada kombinasi S+C+CHI+M, kadar Hg sedikit lebih tinggi dari S+C+CHI yaitu sebesar 15,04 mg/kg. AMF memiliki sifat sebagai perangkap biologis yang kuat sehingga mampu menghalangi berbagai macam ancaman dan stres yang berasal dari luar tanaman yakni lingkungan tanah tempat tanaman hidup. Melalui hifanya, AMF memerangkap kandungan logam sehingga konsentrasi Hg di akar tanaman kombinasi S+C+CHI+M cenderung lebih besar dibandingkan S+C+CHI yang tidak memiliki pelindung biologis. Pada kombinasi S+C+CHI, Hg turut terikat dan masuk ke dalam sistem akar kadarnya terbilang sangat rendah dibanding kedua perlakuan lainnya (12,27 mg/kg). Pola ini menunjukkan peran *chitosan* sebagai agen pengkhelat sekaligus akselerator metabolisme menyebabkan akar berfungsi sebagai saluran transit menuju batang tanaman dibanding menjadi tempat penyimpanan Hg.

Selanjutnya pada batang tanaman, kombinasi S+C+CHI mencatat nilai tertinggi sebesar 85,50 mg/kg, diikuti S+C senilai 12,05 mg/kg, dan diakhiri oleh S+C+CHI+M sebanyak 9,22 mg/kg (Gambar 4.4). Konsentrasi Hg di batang tanaman kombinasi S+C+CHI tujuh kali lipat konsentrasi pada akar tanamannya. Nilai ini terbilang sangat tinggi di mana hampir mewakili sebagian besar konsentrasi Hg di tanah.



*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

Gambar 4.4 Grafik Kadar Hg dalam Batang Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF

Kombinasi S+C+CHI menunjukkan translokasi Hg tercepat menuju jaringan batang dapat dijelaskan melalui dua mekanisme yang terjadi yaitu *dissolved organic matter* (DOM) antara Hg dengan kompos, kemudian didukung oleh karakteristik *chitosan* yang tergolong *low molecular weight chitosan*. Mula-mula kompos menyumbangkan bahan organik terlarut (*dissolved organic matter*) ke dalam tanah. Hg tanah yang umumnya terikat kuat di mineral liat atau oksida logam tanah (bentuk tidak larut, ketika bereaksi dengan bahan organik akan membentuk ikatan kovalen kuat dalam bentuk organo-merkuri yang larut sehingga sangat mudah dimobilisasikan menuju pucuk tanaman (Chen dkk., 2023). Selanjutnya karakteristik *low molecular weight chitosan* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki berat molekul sangat rendah (4 kDa) dan derajat deasetilasi tinggi (96,44%) (Tabel 3.1). *Chitosan* jenis ini memiliki gugus yang sangat reaktif jika berada di lingkungan asam (pH < 7) dan berat molekul yang rendah menghasilkan kelarutan yang tinggi (Román-Doval dkk., 2023). Kompleks organo-merkuri-*chitosan* ini diduga lebih mudah melewati endodermis akar dan masuk ke dalam *xylem* dibandingkan bentuk ion logam bebas, sehingga menghasilkan translokasi dan bioakumulasi yang lebih tinggi pada jaringan tunas (Mosquera dkk., 2024).

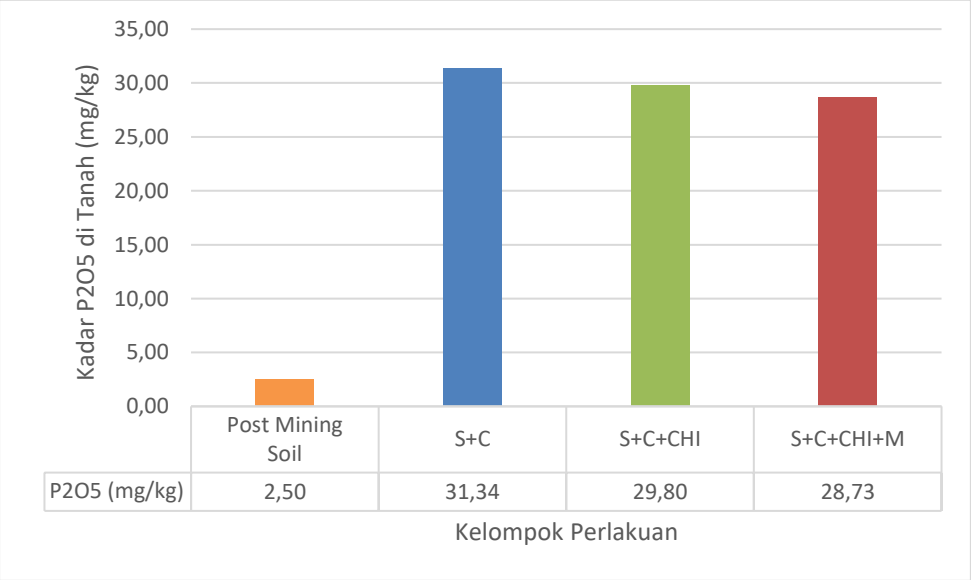
Perlakuan S+C menempati posisi tertinggi kedua untuk kadar Hg batang yang disebabkan oleh mobilisasi Hg dengan bantuan kompos, sebagai bagian dari respons stres tanaman terhadap toksisitas logam di tanah. Sebagian besar Hg disalurkan menuju batang tanpa mekanisme penghalang biologis dan kimiawi yang memadai, meskipun tidak secepat kombinasi S+C+CHI yang memiliki *chitosan* sebagai *carrier* Hg ke puncak tanaman. Sebaliknya kombinasi S+C+CHI+M menunjukkan kadar Hg batang yang paling rendah di antara ketiga perlakuan, sama seperti data yang didapatkan untuk Hg tanah. Secara mekanis, rendahnya translokasi Hg ke batang pada tanaman bermikoriza dapat dijelaskan melalui penyekapan Hg di dalam struktur fungi seperti arbuskula, serta pengikatan oleh glomalin di zona ekstraradikal, yang secara efektif mengurangi jumlah Hg bebas yang tersedia

untuk dimuat ke dalam *xylem* dan ditranslokasikan lebih lanjut ke bagian atas tanaman (Guo dkk., 2023).

4.3 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap Nutrien Fosfor (P)

4.3.1 Kadar P_2O_5 dalam Tanah

P_2O_5 merupakan senyawa kimia yang digunakan untuk menunjukkan jumlah fosfor dalam tanah dan tanaman. Kandungan ini memproyeksikan jumlah nutrisi yang perlu didapatkan tanaman. Bahan-bahan ini berperan untuk melarutkan P yang terikat pada mineral tanah menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman (Lu dkk., 2023). Dalam penelitian ini, kadar P_2O_5 tersedia di dalam tanah *post mining soil* teruji hanya terdapat 2,50 mg/kg. Pada kelompok perlakuan, S+C mencatat nilai tertinggi (31,34 mg/kg), diikuti S+C+CHI (29,80 mg/kg), dan S+C+CHI+M terendah (28,73 mg/kg) (Gambar 4.5). Berdasarkan standar baku mutu ketersediaan P_2O_5 yang dimuat dalam Tabel 4.3, kadar P_2O_5 tanah tanpa perlakuan termasuk kategori sangat rendah, sedangkan ketiga kelompok perlakuan termasuk dalam kategori tinggi.



*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

Gambar 4.5 Grafik Kadar P_2O_5 dalam Tanah Pra dan Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, serta AMF

Tabel 4.3 Standar Baku Mutu Ketersediaan P_2O_5 dalam Tanah

Kadar P_2O_5 (mg/kg)	Kategori
< 10	Sangat Rendah
10-15	Rendah
16-25	Sedang
26-35	Tinggi
>35	Sangat Tinggi

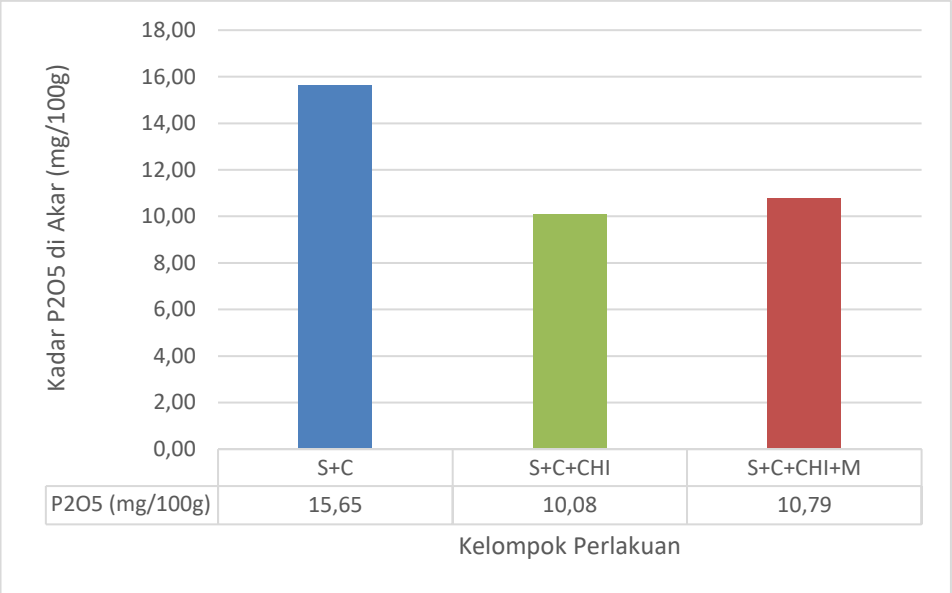
Sumber: Pusat Penelitian Tanah, 1983

Pada perlakuan S+C, ketersediaan P di dalam tanah tercatat melimpah karena kompos menyediakan sumber P organik yang dilepaskan secara bertahap melalui mineralisasi mikroba, namun tanpa kehadiran agen stimulasi tambahan berupa AMF dan *chitosan*, mekanisme transpor internal tanaman untuk memanfaatkan P tidak berjalan efisien. Akibatnya, sebagian besar P terlarut tetap berada di dalam kompartemen tanah dan zona perakaran, bukannya ditranslokasikan secara aktif menuju jaringan tanaman bagian atas. Pada perlakuan S+C+CHI dan S+C+CHI+M, kadar P di dalam tanah cenderung lebih rendah dibandingkan S+C, mengindikasikan aktivitas pelarutan dan penyerapan P yang lebih tinggi oleh jaringan tanaman.

Pada kombinasi S+C+CHI, *chitosan* berperan sebagai transporter nutrisi tanaman yang mampu memindahkan P secara cepat menuju jaringan akar dan batang tanaman. Sedangkan pada kombinasi S+C+CHI+M, jaringan hifa ekstraradikal AMF mampu menjangkau zona tanah yang tidak terjangkau oleh akar tanaman sehingga P yang berada di luar zona deplesi akar dapat dimobilisasi secara lebih efisien menuju jaringan tanaman (Lu dkk., 2023). Meskipun perbedaan nilai kedua kombinasi tidak begitu signifikan, namun nilai tersebut dapat menunjukkan perbedaan kecepatan translokasi *chitosan* oleh S+C+CHI yang menyerap P_2O_5 di zona perakaran saja, sedangkan S+C+CHI+M mampu menyerap sedikit lebih banyak karena perluasan jangkauan ekstraksi oleh AMF. Pola ini menunjukkan bahwa kadar P_2O_5 tanah rendah pada kedua perlakuan bukan merupakan indikasi kekurangan hara, melainkan representasi dari tingginya aktivitas serapan yang berlangsung pada sistem akar dan batang tanaman.

4.3.2 Kadar P_2O_5 dalam Jaringan Tanaman

Kadar P_2O_5 di akar tanaman menunjukkan pola yang sejalan dengan kadar di tanah: S+C tertinggi (15,65 mg/100g), diikuti S+C+CHI+M (10,79 mg/100g), dan kadar terendah terdapat pada S+C+CHI (10,08 mg/100g) (Gambar 4.6). Tingginya kadar P pada akar perlakuan S+C mengindikasikan bahwa P yang diserap dari tanah pada perlakuan ini cenderung tertahan di zona perakaran, karena tanpa kehadiran *chitosan* maupun AMF, tanaman tidak memiliki mekanisme stimulasi tambahan untuk mempercepat translokasi P menuju jaringan atas.



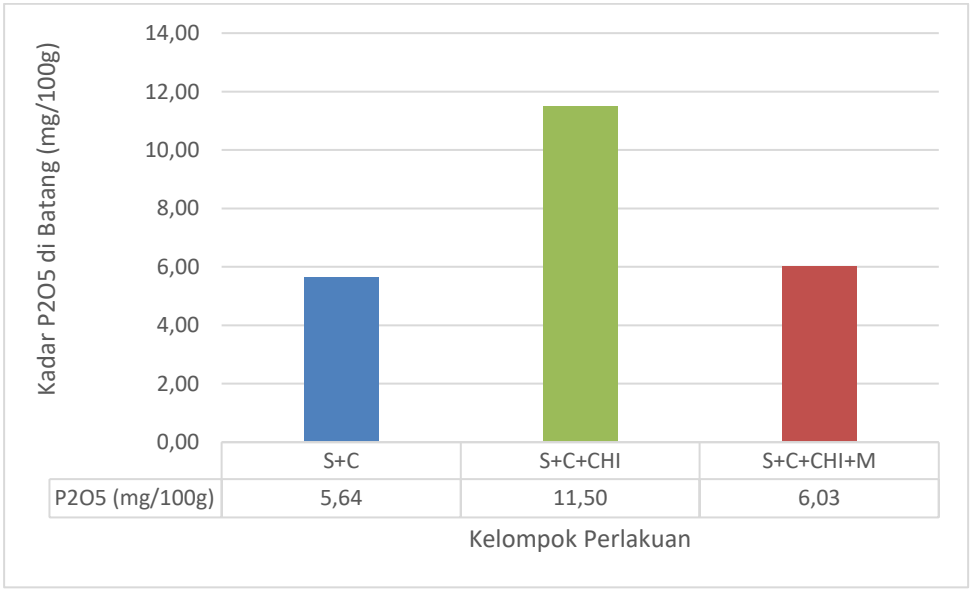
*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

Gambar 4.6 Grafik Kadar P_2O_5 dalam Akar Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF

Sebaliknya, rendahnya kadar P akar pada S+C+CHI merupakan yang terendah (10,08 mg/100g) sejalan dengan mekanisme kerja *chitosan* sebagai molekul sinyal yang berperan sebagai transporter nutrisi tanaman, sehingga P yang diserap akar segera "dipompa" menuju batang melalui *xylem* alih-alih terakumulasi di jaringan akar itu sendiri. Pada kombinasi S+C+CHI+M, kadar P 10,79 mg/100g), sedikit lebih tinggi dari S+C+CHI namun jauh di bawah S+C. Pola ini mencerminkan karakteristik khas jalur serapan AMF, di mana P yang diserap oleh hifa AMF ditransfer ke akar melalui struktur

arbuskula, namun tidak disimpan dalam konsentrasi tinggi di jaringan akar, melainkan segera didistribusikan lebih lanjut sesuai kebutuhan fisiologis tanaman secara keseluruhan. Berbeda dengan S+C+CHI yang menjadikan akar sebagai penyalur tercepat menuju pucuk tanaman, akar pada tanaman bermikoriza berperan sebagai titik transit dalam jaringan simbiosis yang lebih luas, bukan sebagai reservoir utama (Wang et al., 2023).

Selanjutnya pada jaringan batang menunjukkan perlakuan S+C+CHI mencatat kadar tertinggi secara signifikan (11,50 mg/100g), hampir dua kali lipat dibandingkan S+C+CHI+M (6,03 mg/100g) dan S+C (5,64 mg/100g) yang nilainya relatif berdekatan (Gambar 4.7). Temuan ini konsisten dan menguatkan data P_2O_5 bahwa P yang berhasil dimobilisasi dari tanah pada perlakuan ini sebagian besar berhasil ditranslokasikan hingga ke jaringan batang, *Chitosan* sebagai pembawa tidak hanya melarutkan P di rizosfer, tetapi juga mendorong perubahan struktural meliputi akar peningkatan diameter ujung akar dan percabangan yang mempercepat kapasitas transportasi hara menuju jaringan atas tanaman. Mekanisme ini menjadikan konsentrasi P optimal tercapai pada jaringan yang paling membutuhkannya yaitu batang dan daun sebagai pusat fotosintesis aktif.



*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

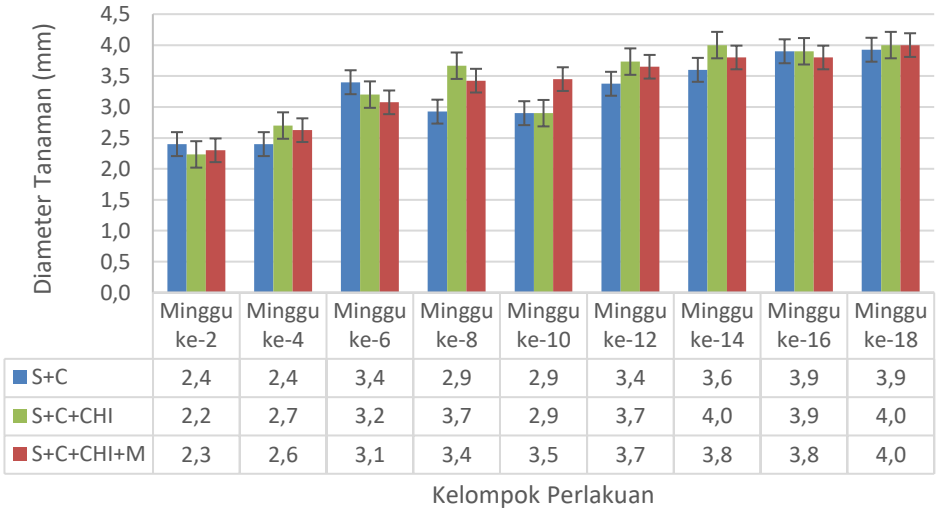
Gambar 4.7 Grafik Kadar P_2O_5 dalam Batang Tanaman Pasca Pemberian Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF

Kombinasi S+C+CHI+M menunjukkan kadar P yang tergolong sedang dapat dijelaskan dengan mekanisme kerja AMF yang selaras dengan konsep *nutrient use efficiency* (NUE). Konsep ini didefinisikan sebagai kemampuan tanaman menghasilkan biomassa per unit hara yang tersedia/diberikan. AMF membentuk hubungan simbiosis di mana jaringan hifa jamur berfungsi sebagai penampung eksternal bagi fosfor dan mendistribusikannya secara merata ke seluruh jaringan tanaman, alih-alih terakumulasi pada konsentrasi tertinggi di titik tertentu seperti batang (Lu dkk., 2023).

4.4 Pengaruh Kombinasi AMF, *Chitosan*, dan Bahan Pembenah Tanah Terhadap Laju Pertumbuhan Tanaman *Melaleuca Cajuputi*

4.4.1 Diameter & Tinggi Tanaman

Pertumbuhan diameter dan tinggi tanaman menunjukkan perbedaan atau fluktuasi setiap minggu pengukuran di masing-masing kelompok perlakuan. Pada diameter tanaman, perlakuan S+C+CHI+M memperlihatkan tren peningkatan yang paling konsisten, dari 2,30 mm pada minggu ke-2 menjadi 4,00 mm pada minggu ke-18, tanpa penurunan signifikan di sepanjang periode pengamatan (Gambar 4.8).



	Minggu ke-2	Minggu ke-4	Minggu ke-6	Minggu ke-8	Minggu ke-10	Minggu ke-12	Minggu ke-14	Minggu ke-16	Minggu ke-18
S+C	2,4	2,4	3,4	2,9	2,9	3,4	3,6	3,9	3,9
S+C+CHI	2,2	2,7	3,2	3,7	2,9	3,7	4,0	3,9	4,0
S+C+CHI+M	2,3	2,6	3,1	3,4	3,5	3,7	3,8	3,8	4,0

*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

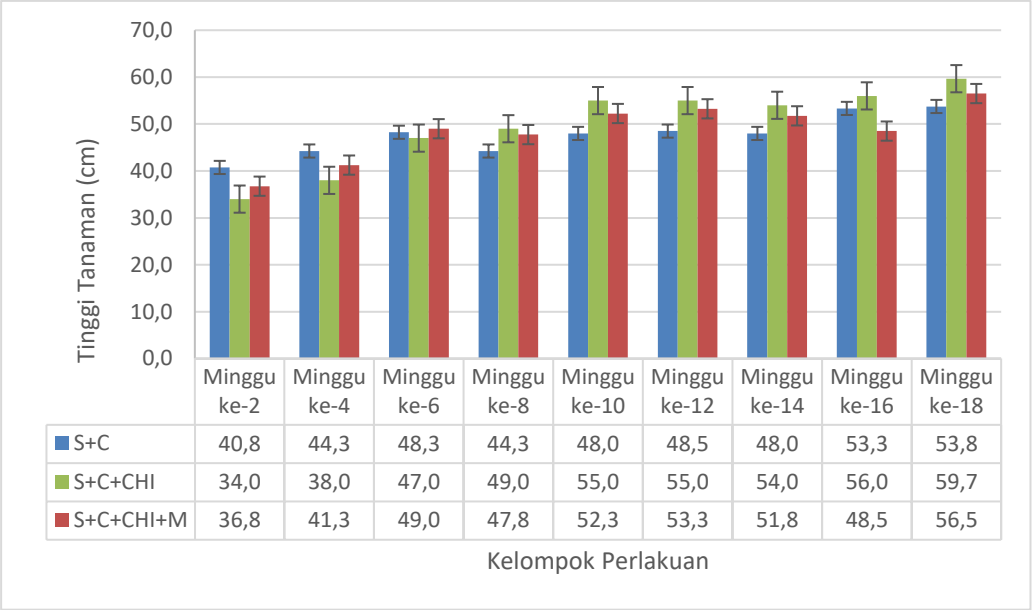
Gambar 4.8 Grafik Perbedaan Diameter Tanaman *Melaleuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF

Penambahan kompos memberikan landasan hara dan bahan organik yang diperlukan untuk pembelahan sel, sementara *chitosan* menstimulasi hormon pertumbuhan dan mendorong pembelahan serta perpanjang sel secara lebih terarah (Ingle dkk., 2022). Kehadiran AMF membentuk jaringan hifa yang luas di mana secara signifikan meningkatkan penyerapan hara dengan lebih konsisten dari waktu ke waktu melalui eksplorasi air dan hara di sekitar rizofer tanah (Guo dkk., 2024). Kemampuan ini mendukung pertumbuhan sel kambium menjadi lebih kontinu dan tidak terlalu bergantung pada kondisi tanah tambang yang heterogen. Fenomena AMF yang baru menunjukkan pengaruh signifikan mulai minggu ke-4 sejalan dengan proses inokulasi spora AMF yang membutuhkan waktu untuk berkecambah.

Sebaliknya perlakuan S+C+CHI menunjukkan lonjakan yang cepat namun bersifat jangka pendek sehingga pola pertumbuhannya sangat fluktuatif. Pola ini mengindikasikan efek stimulasi *chitosan* yang bertindak sebagai stimulan hormon yang mampu menembus dinding sel tanaman dan merangsang perkembangan akar dan tunas. Namun tanpa kehadiran AMF, efek stimulasi tersebut cenderung menghasilkan respons pertumbuhan yang tidak sekonsisten kombinasi S+C+CHI+M.

Kombinasi S+C juga mengalami fluktuasi dengan naik tajam ke 3,40 mm pada minggu ke-6 namun turun kembali ke 2,93 mm pada minggu ke-8, sebelum naik lagi secara tidak stabil hingga akhir pengamatan. Pola fluktuatif semacam ini umum ditemukan pada tanaman yang mengalami tekanan logam berat tanpa mekanisme proteksi biologis yang memadai, di mana tanaman harus terus-menerus menyesuaikan alokasi energi antara pertumbuhan dan detoksifikasi internal (Boorboori & Zhang, 2022).

Selanjutnya untuk parameter tinggi tanaman, pola pertumbuhan tinggi tanaman memperkuat temuan pada parameter diameter, dengan perbedaan antar perlakuan yang bahkan lebih jelas (Gambar 4.9 dan Gambar 4.10). Pada minggu ke-2 dan ke-4, S+C mencatat tinggi tertinggi, sementara S+C+CHI berada di posisi terendah. Namun, sejak minggu ke-6 hingga ke-8, S+C+CHI mencapai pertumbuhan tinggi tertinggi dibanding kedua perlakuan sampai di akhir pengamatan.



	Minggu ke-2	Minggu ke-4	Minggu ke-6	Minggu ke-8	Minggu ke-10	Minggu ke-12	Minggu ke-14	Minggu ke-16	Minggu ke-18
S+C	40,8	44,3	48,3	44,3	48,0	48,5	48,0	53,3	53,8
S+C+CHI	34,0	38,0	47,0	49,0	55,0	55,0	54,0	56,0	59,7
S+C+CHI+M	36,8	41,3	49,0	47,8	52,3	53,3	51,8	48,5	56,5

*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

Gambar 4.9 Grafik Perbedaan Tinggi Tanaman *Melaleuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF



*Keterangan gambar dari paling kiri ke kanan: Kode 2: S+C; Kode 10:S+C+CHI; Kode 11: S+C+CHI+M)

Gambar 4.10 Tinggi Tanaman *Mealeuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF Pasca Pemanenan

Pola ini menunjukkan adanya potensi penyerapan hara yang cepat dalam jumlah besar dan ditranslokasikan ke batang sesegera mungkin. *Chitosan* diketahui membutuhkan waktu untuk mengaktifkan gen transporter nutrisi dan jalur hormonal secara penuh sehingga proses adaptasinya dapat diamati pada periode awal (Ingle dkk., 2022). Ketika telah aktif, pasokan unsur hara amat efisien menuju titik tumbuh secara langsung dan mendorong percepatan pertumbuhan tinggi yang tajam dari minggu ke-8 dan seterusnya.

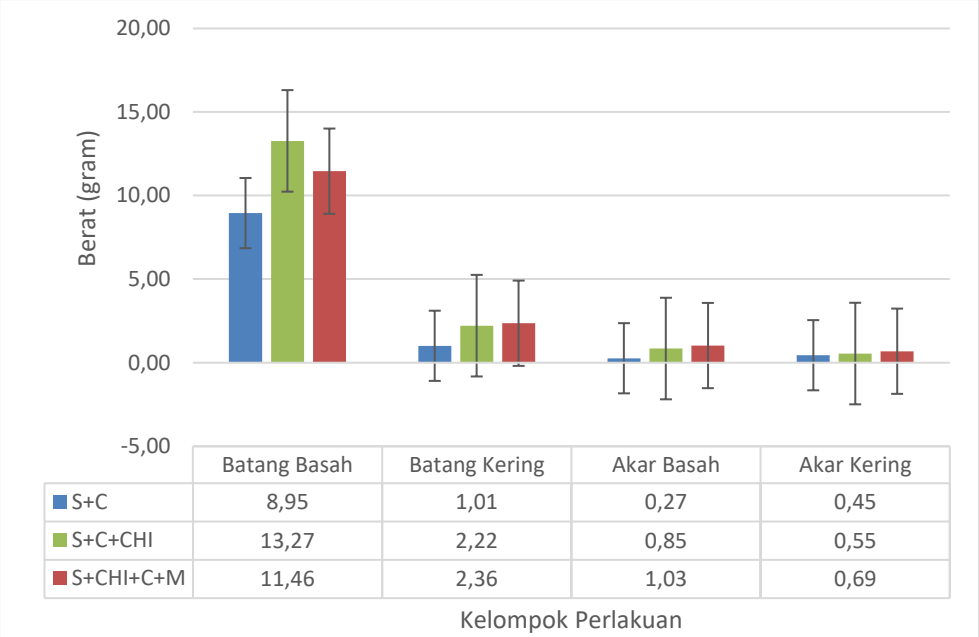
Sebaliknya perlakuan S+C yang unggul di awal justru mengalami perlambatan dan cenderung stagnan sepanjang periode pengamatan. Pola ini menunjukkan sebagian besar hara cenderung "terjebak" di tanah dan akar sehingga sukar untuk bertranslokasi menuju batang tanpa bantuan agen lainnya. Perlakuan S+C+CHI+M menempati posisi menengah-atas secara konsisten meskipun sempat turun pada minggu ke-16 sebelum kembali naik pada minggu ke-18. Pola ini menunjukkan adanya periode penyesuaian fisiologis sementara yang bisa jadi berasal dari dinamika kolonisasi AMF yang terus berkembang. Berdasarkan data ini, kombinasi S+C+CHI+M dapat disimpulkan sebagai perlakuan terbaik untuk parameter diameter tanaman dan S+C+CHI lebih unggul untuk parameter tinggi tanaman.

4.4.2 Biomassa Tanaman

Biomassa tanaman *Melaleuca cajuputi* terdiri dari akar dan berat batang yang terbagi menjadi dua kelompok yakni berat basah dan berat kering. Penimbangan biomassa berat basah dilakukan untuk mengetahui kandungan air tanaman saat panen. Sedangkan biomassa berat kering didapatkan dari pengeringan jaringan tanaman menggunakan oven. Berat kering menunjukkan akumulasi bahan organik dan anorganik (biomassa) yang terkandung di dalam tanaman.

Data biomassa menunjukan bahwa kombinasi S+C+CHI+M menghasilkan akumulasi biomassa struktural dan kering tertinggi khususnya pada bagian akar dibanding kedua perlakuan lainnya (Gambar 4.11). Meskipun perlakuan S+C+CHI mencatat berat batang segar tertinggi, yang kemungkinan disebabkan oleh penyerapan air yang cepat akibat stimulasi *chitosan*, namun nilai berat ini tidak mencerminkan akumulasi biomassa

struktural sesungguhnya karena dipengaruhi oleh kandungan air jaringan saat pengukuran.



*S+C (*Soil* + *Compost*); S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*); S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF).

Gambar 4.11 Grafik Perbedaan Biomassa Tanaman *Melaleuca Cajuputi* dengan Kombinasi Kompos, *Chitosan*, dan AMF

Keunggulan berat kering pada kombinasi S+C+CHI+M mengindikasikan bahwa AMF tidak hanya memfasilitasi penyerapan air dan hara jangka pendek, namun turut mengubah pola metabolisme tanaman secara fundamental dan membangun jaringan struktural yang lebih kokoh dan tahan dari tekanan lingkungan (Guo dkk., 2024). AMF meningkatkan efisiensi penyerapan fosfor dan air melalui jaringan hifanya yang luas, yang merupakan faktor pembatas utama pada tanah bekas tambang yang miskin hara (Putra dkk., 2022), sementara kompos memperbaiki struktur dan kesuburan tanah secara keseluruhan melalui penambahan bahan organik (Arlius & Putri., 2024), dan *chitosan* melindungi jaringan tanaman dari kerusakan akibat kandungan Hg sehingga proses fotosintesis dapat berjalan lebih optimal (Abdelhameed dkk., 2024).

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kombinasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)*, Chitosan,* dan Bahan Pembenah Tanah terbukti memiliki potensi untuk meningkatkan laju pertumbuhan tanaman *Melaleuca cajuputi* pada tanah bekas tambang emas, dengan kombinasi terbaik untuk parameter diameter dan biomassa tanaman adalah S+C+CHI+M (*Soil* + *Compost* + *Chitosan* + AMF) yang meraih pertumbuhan diameter terstabil dan tertinggi (4,00 mm) dan biomassa kering terberat yang kaya akan kandungan organik (batang: 2,35 gram; akar: 0,69 gram). Adapun untuk parameter tinggi tanaman, meskipun kombinasi S+C+CHI+M juga memberikan hasil yang moderat, kombinasi S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*) juga patut dipertimbangkan karena mampu mencapai pertumbuhan tinggi tanaman tertinggi yang cepat dan konsisten hingga akhir pengamatan (59,7 cm).
2. Kombinasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)*, Chitosan,* dan Bahan Pembenah Tanah terbukti memiliki tendensi dalam penyerapan logam merkuri (Hg) di tanah bekas tambang emas, dengan kombinasi terbaik adalah S+C+CHI (*Soil* + *Compost* + *Chitosan*). Kombinasi ini terbukti mampu memindahkan sebagian besar Hg di dalam tanah menuju jaringan tanaman paling puncak yakni batang tanaman (85,50 mg/kg).

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah:

1. Penimbangan biomassa tanaman terutama berat basah tanaman sebaiknya diperhatikan kembali untuk memastikan berat jaringan tanaman terpisah antara batang dan akar tanaman.

2. Eksplorasi dosis AMF, *chitosan*, dan bahan pembenah tanah sebaiknya senantiasa dilaksanakan untuk mengetahui dosis terbaik yang paling efektif.
3. Penentuan ukuran partikel *chitosan* sebaiknya juga dianalisis menggunakan alat SEM (*Scanning Electron Microscope*) dikarenakan XRD hanya menentukan ukuran kristalit bukan mengukur ukuran partikel.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelhameed, R. E., Abdalla, H., & Abdel-Haleem, M. (2024). Offsetting pb induced oxidative stress in Vicia faba plants by foliar spray of chitosan through adjustment of morpho-biochemical and molecular indices. BMC *Plant Biology*, 24(1), 557.

Akbar, M. A., Wahyuni, S., Wulandari, M. N., Ramdani, I., & Qurana, N. (2026). Revegetasi Lahan Bekas Eksplorasi Tambang Emas Berbasis Agroforestri Tanaman Adaptif. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 11(2), 82-93.

Alloway, B. J. (1995). Soil processes and the behaviour of metals. *Heavy metals in soils*, *13*, 3488.

Al-Mur, B. A. (2026). Application of shrimp shell-derived chitosan for heavy metal biosorption. *Journal of King Saud University–Science*, 38.

Arlius, F., & Putri, E. L. (2024). Aplikasi Biokanat Guna Memperbaiki Sifat Kimia dan Menanggulangi Kontaminan Merkuri di Tanah Bekas Tambang Emas. *Indonesian Journal of Agricultural Sciences/Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 29(2).

Aryanti, H., & Hera, H. (2026). Sifat kimia tanah area pasca tambang emas: Studi kasus pertambangan emas tanpa izin di Kenegerian Kari. *Jurnal Agroteknologi*, 16(1), 45-52. https://ejournal.uin-suska.ac.id/index.php/agroteknologi/article/view/5681

Atemoagbo, O. P. (2024). Risk assessment and remediation options for oil-contaminated soil and groundwater: a comparative analysis of chemical, physical, and biological treatment methods. *Research and Analysis Journals*.

Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk. (2023). *Petunjuk Teknis Edisi 3 Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk*. Diakses 18 Mei 2026.

Banerjee, S., Mandal, J., Sarkar, D., Datta, R., & Bhattacharyya, P. (2025). A review and meta-analysis of the efficacy of arbuscular mycorrhizal fungi in remediating toxic metals in mine-affected soils. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1532169.

Chen, W., Yu, Z., Yang, X., Wang, T., Li, Z., Wen, X., ... & 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.

Chimultiguna. (2025). *Shrimp Shell Chitosan*. Diujikan 29 Oktober 2025.

Citra, Y., Setiawan, B., & Hermanto, S. R. (2025). Sinergi Biochar Arang Sekam dan Kompos Kotoran Ayam dalam Remediasi Lahan Bekas Tambang Emas. *Agrikultura*, 36(3), 512-525.

Collazo, S., Vélez, E., Correa, J. D., Marín, J. F., Saldarriaga, J. F., & López, J. E. (2026). Assessment of potentially toxic elements in mine tailings and their categorization and prioritization as environmental liabilities in gold mining areas of Antioquia, Colombia. *Environmental Geochemistry and Health*, 48(10), 444.

Coulibaly, K., & Sako, A. (2024). Geostatistical modelling of physico-chemical properties of soils impacted by artisanal gold mining and farming: implications for soil environmental quality assessment. *Sustainable Environment*, 10(1). https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2333631

Daniswati, N., Mansur, I., & Herliyana, E. N. (2026). Block compost for acid mine drainage remediation and as a growing medium for Melaleuca cajuputi seedlings. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 13(1), 9555-9565.

Dietrich, P., Cesarz, S., Eisenhauer, N., & Roscher, C. (2020). Effects of steam sterilization on soil abiotic and biotic properties. *Soil Organisms*, 92(2), 99-108.

Du, Y., Tian, Z., Zhao, Y., Wang, X., Ma, Z., & Yu, C. (2024). Exploring the accumulation capacity of dominant plants based on soil heavy metals forms and assessing heavy metals contamination characteristics near gold tailings ponds. *Journal of Environmental Management*, 351, 119838.

Entoplast. (2025). Chitosan: A Sustainable Solution for Heavy Metal Remediation in Contaminated Soil. *Entoplast*. https://www.entoplast.com/post/chitosan-a-sustainable-solution-for-heavy-metal-remediation-in-contaminated-soil

Fahruddin, F., Hartati, H., Azmin, N., Baktiar, B., Nasir, Muh., & Andang, A. (2021). Pengaruh Penambahan Arang Sekam Terhadap Pertumbuhan Tanaman Kangkung Darat (Ipomoea reptans). *ORYZA (JURNAL PENDIDIKAN BIOLOGI)*, 10(1), 1–7. https://doi.org/10.33627/oz.v10i1.53

Fall, A. F., Nakabonge, G., Ssekandi, J., Founoune-Mboup, H., Apori, S. O., Ndiaye, A., ... & Ngom, K. (2022). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil. *Frontiers in fungal biology*, 3, 723892.

Gaso, M. T., Bare, Y., Bunga, Y. N., & Putra, S. H. J. (2022). Respon Pertumbuhan Tanaman Kangkung Darat (Ipomea reptans Poir) setelah Pemberian Arang Sekam Padi. *Spizaetus: Jurnal Biologi Dan Pendidikan Biologi*, 3(2), 1-9.

Global Soil Laboratory Network. (2021). Standard operating procedure for soil available phosphorus Bray I and Bray II method. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1e4693b1-9ee2-4e29-91d9-e2f310a8c384/content

Goci, M. C., Leudjo Taka, A., Martin, L., & Klink, M. J. (2023). Chitosan-based polymer nanocomposites for environmental remediation of mercury pollution. *Polymers*, 15(3), 482.

Guo, Y., Martin, K., Hrynkiewicz, K., & Rasche, F. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi-based bioremediation of mercury: insights from zinc and cadmium transporter studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(3), 3475-3488.

Hamada, R., & Osame, M. (2023). Minamata disease and other mercury syndromes. *In Toxicology of Metals, Volume I* (pp. 337-351). CRC press.

Hajar, T. I., Ramanda, R. F., & Hermanto, S. R. (2025). PENGARUH KOMPOS LIMBAH SAYURAN TERHADAP BIBIT KARET (Hevea brasiliensis Muell. Arg) PADA TANAH BEKAS TAMBANG EMAS. *Journal of Agro Plantation* (JAP), 4(1), 342-350.

Hatika, R. G. (2022). Kandungan logam berat dalam tanah pada daerah sekitar penambangan emas di Sungai Kuantan. Sainsmat: *Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 11(1), 95-103.

Hura, J. K., & Gulo, M. (2024). Analisis permeabilitas tanah berpasir dan tanah lempung dalam hubunganya dengan manajemen irigasi. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 1(2), 60-67.

Ingle, P. U., Shende, S. S., Shingote, P. R., Mishra, S. S., Sarda, V., Wasule, D. L., ... & Gade, A. (2022). Chitosan nanoparticles (ChNPs): A versatile growth promoter in modern agricultural production. *Heliyon*, 8(11).

Juliarti, A., Wijayanto, N., Mansur, I., & Trikoesoemaningtyas. (2022). Cajuput (Melaleuca cajuputi (L.) Powell) oil yield and cineole analysis in ex coal mining land with monoculture and agroforestry patterns. *Jurnal Sylva Lestari*, 10(2), 202-210. https://doi.org/10.23960/jsl.v10i2.551

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2021. Perkembangan Kebijakan Sub Sektor Pertambangan Mineral dan Batubara. Available online: https://jdih.esdm.go.id/storage/document/Permen%20ESDM%20Nomor%2016%20Tahun%202020.pdf

Lu, Y., Yan, Y., Qin, J., Ou, L., Yang, X., Liu, F., & Xu, Y. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance phosphate uptake and alter bacterial communities in maize rhizosphere soil. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1206870.

LTP. (2025). Quantification Methods for Measuring Plant Growth | Live to Plant. In *Livetoplant.com.* https://livetoplant.com/quantification-methods-for-measuring-plant-growth/

Manoj, S. R., Karthik, C., Kadirvelu, K., Arulselvi, P. I., Shanmugasundaram, T., Bruno, B., & Rajkumar, M. (2020). Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: A review. *Journal of environmental management*, 254, 109779.

Mansur, I., Rizkyandana, A., & Priyanto, P. (2022). Cajeput (Melaleuca cajuputi) seedlings endurances to various media contaminated by acid mine drainage. *Journal of Tropical Silviculture*, 13(3), 208-217. https://doi.org/10.29244/j-siltrop.13.03.208-217

Marbun, J., Gunawan, I. A., & Rahsia, S. A. (2025). REKAYASA LINGKUNGAN DALAM PEMULIHAN PENCEMARAN TANAH PADA LAHAN BEKAS PENAMBANGAN EMAS TANPA IJIN DI DESA KAYU ARA KECAMATAN MANDOR KABUPATEN LANDAK KALIMANTAN BARAT. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 25(1), 9-19.

Marwanza, I., Azizi, M. A., Kurniawati, R., Dahani, W., Subandrio, S., Purwiyono, T. T., & Nuriana, S. D. (2024). Pembinaan Penambangan Emas Skala Kecil dan Masyarakat Lingkar Tambang Emas di Desa Cisarua, Bogor. *Abdimas Universal*, 6(2), 307-313.

Maulidan, K., & Putra, B. K. (2024). Pentingnya unsur hara fosfor untuk pertumbuhan tanaman padi. *Journal of Biopesticides and Agriculture Technology*, 1(2), 47-54.

Meutia, A. A., Lumowa, R., & Sakakibara, M. (2022). Indonesian Artisanal and Small-Scale Gold Mining—A Narrative Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3955. https://doi.org/10.3390/ijerph19073955

Mestanza-Ramón, C., Mora-Silva, D., D'Orio, G., Tapia-Segarra, E., Gaibor, I. D., Esparza Parra, J. F., Chávez Velásquez, C. R., & Straface, S. (2022). Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador. *Sustainability*, 14(11), 6854. https://doi.org/10.3390/su14116854

Mosley, L. M., Rengasamy, P., & Fitzpatrick, R. (2024). Soil pH: Techniques, challenges and insights from a global dataset. *European Journal of Soil Science*, *75*(6), e70021.

Mosquera Chaverra, L., Paredes Cuervo, D., López Gutiérrez, A., Arias, C. A., & Carvalho, P. N. (2024). Phytoremediation of mercury contamination: Bibliometric analysis. *Sustainability*, 16(21), 9408.

Mustapha, A. A., Abdulrahman, B. L., Dawaki, M. U., & Usman, A. (2022). Comparative determination of available phosphorus at different pH levels in Nigerian Savannah soils using Mehlich, Olsen and Bray Methods. *Nigerian Journal of Soil Environmental Research*, *21*, 69-77.

Nata, A. S., Mawardi, A., & Sobwan, I. (2021). Analisis Kelayakan Pengkonsetrasian Bijih Emas Menggunakan Teknik Gravitasi Bebas Merkuri Dengan Meja Goyang Dalam Penambangan Emas Sekala Kecil di Wilayah Pertambangan Rakyat Kokap, Kulonprogo. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian SATU BUMI* (Vol. 2, No. 1).

Novila, N. S., & Puansah, I. (2024). Perubahan kehidupan sosial ekonomi masyarakat akibat adanya tambang emas tanpa izin di desa simpang mandepo. Jurnal Public Issues: *Jurnal Ilmu Sosial, Humaniora, Politik Dan Kebijkan Publik* (JISHPKP), 1(1), 12-22.

Panggabean, S. S. P., Rodhiyah, Z., Ilfan, F., & Ihsan, M. (2022). Indeks beban pencemar sebagai penentu tingkat pencemaran pada lahan bekas pertambangan emas tanpa izin. INSOLOGI: *Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(5), 565-573.

Pangemanan, C., Lobja, X. E., & Nugroho, C. (2022). Identifkasi kerusakan lahan hutan akibat aktivitas pertambangan emas Desa Bowone Kecamatan Tabukan Selatan Tengah. Geographia: *Jurnal Pendidikan dan Penelitian Geografi*, 3(1), 10-17.

Pantouw, I. A. P. S. O., & Ahmad, A. (2022). Perlindungan Hukum Terhadap Masyarakat Akibat Penambangan Emas Di Sungai Tulabolo Yang Tercemar Merkuri. *Borneo Law Review*, 6(2), 187-204.

Pratama, D. (2025). Analisis Kesadaran Hukum Masyarakat Desa Tanjung Benuang Terhadap Perilaku Pertambangan Emas Tanpa Izin (Peti) (Doctoral dissertation, Universitas Jambi).

Pratiwi, Narendra, B. H., Siregar, C. A., Turjaman, M., Hidayat, A., Rachmat, H. H., ... & Susilowati, A. (2021). Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: a review. *Land*, 10(6), 658.

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

Putra, B., Warly, L., & Utama, B. P. (2022). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on nutrients and heavy metals uptake by Pennisetum purpureum cv Mott in phytoremediation of gold mine tailings. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, 10(1).

Querejeta, G. A. (2023). Sterilize methods comparison for soils: cost, time, and efficiency. *International Journal of Methodology*, 2(1), 34-40.

Rahayu, D. R., & Mangkoedihardjo, S. (2022). Kajian bioaugmentasi untuk menurunkan konsentrasi logam berat di wilayah perairan menggunakan bakteri (studi kasus: pencemaran merkuri di sungai krueng sabee, Aceh Jaya). *Jurnal Teknik ITS*, 11(1), F15-F22.

Rahman, A., Haque, M. A., Ghosh, S., Shinu, P., Attimarad, M., & Kobayashi, G. (2023). Modified shrimp-based chitosan as an emerging adsorbent removing heavy metals (chromium, nickel, arsenic, and cobalt) from polluted water. *Sustainability*, 15(3), 2431.

Rahman, S. U., Han, J. C., Ahmad, M., Ashraf, M. N., Khaliq, M. A., Yousaf, M., ... & Du, Z. (2024). Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115791.

Rai, S., Pokhrel, P., Udash, P., Chemjong, M., Bhattarai, N., Thuanthong, A., ... & Nirmal, N. (2025). Chitin and chitosan from shellfish waste and their applications in agriculture and biotechnology industries. Critical Reviews in *Biotechnology*, 45(7), 1508-1526.

Riko, R. P., Sasli, I., & Ramadhan, T. H. (2024). Potensi pemanfaatan lahan bekas tambang emas sebagai media tanam jagung (Zea mays L.) di Desa Mandor. *Jurnal Borneo*, 12(1), 88-95. https://jurnallitbang.kalbarprov.go.id/index.php/litbang/article/view/345

Romadhan, P., Gusmini, G., & Hermansah, H. (2022). Korelasi Derajat Kemasaman Tanah Dan Kandungan Merkuri Tanah Bekas Tambang Emas Melalui Aplikasi Bahan Organik. *EnviroScienteae*, 18(2), 186-192.

Román-Doval, R., Torres-Arellanes, S. P., Tenorio-Barajas, A. Y., Gómez-Sánchez, A., & Valencia-Lazcano, A. A. (2023). Chitosan: Properties and its application in agriculture in context of molecular weight. *Polymers*, 15(13), 2867.

Salam, R. H., Suwardji, S., Fauzi, T., & Kusnarta, I. G. M. (2024). Characteristics of Physical and Chemical Properties of Soil after Gold Processing (Case Study of Unlicensed Gold Mining in the District Sumbawa Regency, Indonesia). *International Journal of Science, Technology & Management*, *5*(3), 591-599.

Santi, R. A., & Rezki, D. (2022). Study Of Soil Physical Properties In Ex-Gold Mining Land, Oil Palm (Elaeis Guineensis Jacq.) Plantation, And Forests On Ultisol. *Jurnal Riset Perkebunan*, 3(2), 77-92.

Saputra, W., Isrun, I., Akbar, R., & Prahastuti, S. W. (2025). IDENTIFIKASI LOGAM BERAT PADA AREA PERTAMBANGAN EMAS DI KECAMATAN BOLANO LAMBUNU. *AGROTEKBIS: JURNAL ILMU PERTANIAN* (e-journal), 13(1), 94-101.

Sari, M. S., & Syamsussabri, M. (2024). Penyuluhan Pengolahan Limbah Pertambangan Emas Rakyat di Desa Dalam. *Jurnal Pengabdian Inovatif Masyarakat*, 1(2), 90-92.

Shu, X., He, J., Zhou, Z., Xia, L., Hu, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Luo, Y., Chu, H., Liu, W., Yuan, S., Gao, X., & Wang, C. (2022). Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 829, 154627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154627

Siregar, E. S., Adawiyah, R., & Putriani, N. (2021). Dampak aktivitas pertambangan emas terhadap kondisi ekonomi dan lingkungan masyarakat muara soma kecamatan batang natal. *Jurnal Education and development*, 9(2), 556-567.

SNI 8910-2021. (2021). Cara Uji Kadar Logam Dalam Contoh Uji Limbah Padat Sedimen dan Tanah Dengan Metode Destruksi Asam. Diakses 13 Mei 2026.

Suarmaprasetya, R. A., & Soemarno, S. (2021). Pengaruh Kompos Kotoran Kambing Terhadap Kandungan Karbon Dan Fosfor Tanah Dari Kebun Kopi Bangelan. *Jurnal Tanah dan Sumerdaya Lahan*, 8(2), 505-514.

Sumarjono, E. (2020). Kompleksitas permasalahan merkuri dalam pengolahan bijih emas berdasarkan perspektif teknis lingkungan manusia dan masa depan. *Kurvatek*, 5(1), 113-122.

Suprianti, M., Rosmalinda, R., & Kurniawan, T. (2025). PENGARUH ARANG SEKAM TERHADAP PERTUMBUHAN BIBIT KAKAO (Theobroma cacao L.) PADA TANAH PASCA TAMBANG. *Journal of Agro Plantation* (JAP), 4(2), 407-415.

Syam, I. S., Hasri, H., & Putri, S. E. (2022). Sintesis Nanokitosan dari Limbah Kulit Udang Windu (Panaeus monodon). *Sainsmat: Jurnal Ilmiah Ilmu Pengetahuan Alam*, 11(1), 59-67.

Syofiani, R. (2021). Upaya Perbaikan Sifat Kimia Lahan Bekas Tambang Emas Dengan Pemberian Amelioran Terhadap Pertumbuhan Kedelai Di Kabupaten Sijunjung. *Jurnal Agrium*, 18(1).

Vedalya, I. P. P. (2024). LOGAM BERAT PADA AIR DAN SEDIMEN SUNGAI WAY RATAI SERTA FAKTOR BIOKONSENTRASI (BCF) DAN FAKTOR TRANSLOKASI (TF) PADA TUMBUHAN DI KOLAM TAILING AKIBAT PENAMBANGAN EMAS SKALA KECIL DI KABUPATEN PESAWARAN PROVINSI LAMPUNG (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS LAMPUNG).

Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., ... & Reddy, S. P. P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth,

enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*, 12(17), 3102.

Wang, G., Jin, Z., George, T. S., Feng, G., & Zhang, L. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant phosphorus uptake through stimulating hyphosphere soil microbiome functional profiles for phosphorus turnover. *New Phytologist*, 238(6), 2578-2593.

Wang, X., He, M., Wang, X., Liu, S., Luo, L., Zeng, Q., ... & Jia, R. (2024). Emerging nanochitosan for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), 12261.

Waqfin, M. S. I., Salam, M. B., Alvina, T., & Pratama, W. A. (2023). Pelatihan Pembuatan Arang Sekam Padi di Desa Pulorejo Tembelang Jombang. *Jumat Pertanian: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 84-87.

Widianti, N. N., Jenius, V. A. S., Hidayat, N. A. R., Sukma, W. M., & Radianto, D. O. (2024). Pengelolaan limbah, faktor, dan penyebab paparan logam berat merkuri pada lingkungan. *Journal Sains Student Research*, 2(2), 118-124.

Wowiling, L. A., Rorong, A. J., & Plangiten, N. N. (2021). Dampak Kebijakan Pertambangan Emas Di Desa Ratatotok Selatan Minahasa Tenggara. *Jurnal Administrasi Publik*, 7(106), 1–11. https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/JAP/article/view/34885

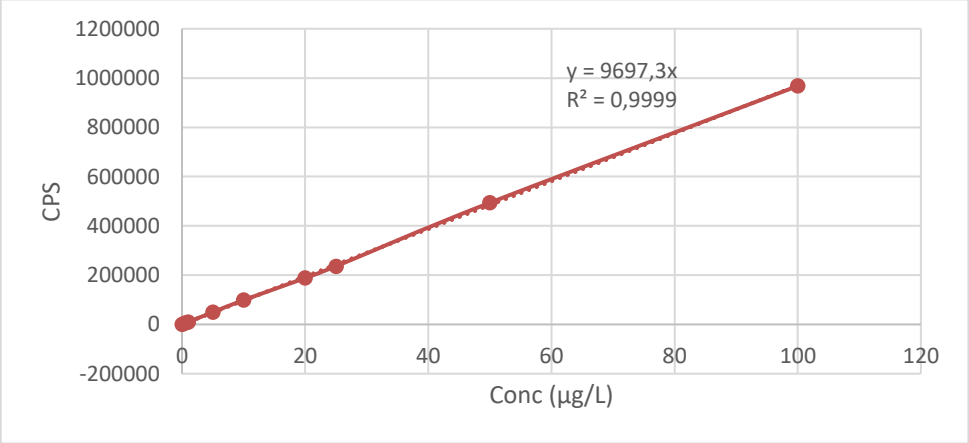
Yasir, M., Saijo, S., & Rosawanti, P. (2026). Pengaruh Arang Sekam Padi dan Pupuk Kandang Kambing terhadap Pertumbuhan dan Hasil Ubi Jalar Ungu pada Tanah Berpasir. *Agritech: Jurnal Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Purwokerto*, *28*(1), 87-95.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Kurva Kalibrasi Larutan Standar Parameter Uji Logam Merkuri (Hg) dan Nutrien Fosfor (P)

Tabel 1. Deret Standar Logam Merkuri (Hg)

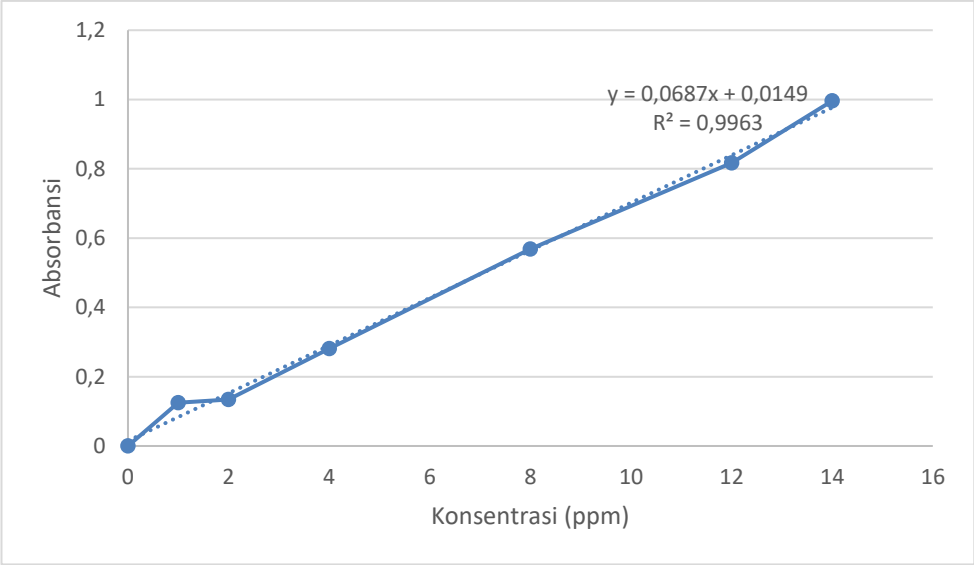
No.	Standar	Cons (µg/L)	CPS
1	Standar 1	0	0
2	Standar 2	0,5	4950,8
3	Standar 3	1	9900,7
4	Standar 4	5	49504
5	Standar 5	10	98824,5
6	Standar 6	20	188144,2
7	Standar 7	25	236056,2
8	Standar 8	50	493795,7
9	Standar 9	100	967784,6



Gambar 1. Kurva Kalibrasi Standar Logam Merkuri (Hg)

Tabel 2. Deret Standar Nutrien Fosfor (P)

No.	Sample ID	Conc (ppm)	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



Gambar 2. Kurva Kalibrasi Standar Nutrien Fosfor (P)

Lampiran 2 Contoh Perhitungan

A. Perhitungan Kadar Logam Merkuri (Hg) dalam Tanah Kombinasi S+C+CHI+M

Diketahui =

Konsentrasi (C) = 16,64 µg/L = 0,016 mg/L

Volume akhir destruksi (V) = 50 mL

Berat contoh uji (W) = 0,52 gram

Fraksi padat (P) = 1

Faktor pengenceran (fp) = 100

$$\text{Kadar logam Hg}\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{C} \times \text{V}}{\text{W} \times \text{P}} \times \text{fp}$$

$$= \frac{0{,}016 \times 50}{0{,}52 \times 1} \times 100$$

$$= 159{,}06 \text{ mg/kg}$$

B. Perhitungan Nutrien Fosfor (P) dalam Tanah (Metode Bray I) Kombinasi S+C+CHI+M

Diketahui:

Intersep (b) = 0,00003

Slope (a) = 0,12531

Absorbansi sampel (y) = 0,0661
Faktor pengenceran (fp) = 20
Faktor koreksi kadar air (fk) = 1
Volume ekstrak = 10 mL
Berat Dipakai = 2,5311 gram
faktor konversi PO_4 menjadi P_2O_5 = 142/190

a. Perhitungan kadar P (ppm)

$$\text{Kadar P} = \left(\frac{\text{y-b}}{\text{a}}\right) \times \text{fp}$$

$$= \left(\frac{0{,}061\text{-}0{,}00003}{0{,}12531}\right) \times 20 = 0{,}487 \text{ ppm}$$

b. Perhitungan P_2O_5 Tersedia (mg/100 gram)

$$\text{Kadar P Tersedia (ppm)} = \text{ppm kurva} \times \left(\frac{\text{ml ekstrak}}{1.000 \text{ ml}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}}{\text{g contoh}}\right) \times \text{fp} \times \left(\frac{142}{190}\right) \times \text{fk}$$

$$= 0{,}487 \times \left(\frac{10}{1.000}\right) \times \left(\frac{1000}{2{,}5311}\right) \times 20 \times \left(\frac{142}{190}\right) \times 1$$

$$= 28{,}73 \text{ mg/kg}$$

C. Perhitungan Nutrien Fosfor (P) dalam Jaringan Tanaman (Metode Ekstraksi HCl 25%) Kombinasi S+C+CHI+M (Batang Tanaman)

Diketahui:

Intersep (b) = 0,00003
Slope (a) = 0,12531
Absorbansi sampel (y) = 0,054
Faktor pengenceran (fp) = 20
Faktor koreksi kadar air (fk) = 1,04
Volume ekstrak = 10 mL
Berat Dipakai = 1,111 gram
faktor konversi PO_4 menjadi P_2O_5 = 142/190

a. Perhitungan kadar P (ppm)

$$\text{Kadar P} = \left(\frac{\text{y-b}}{\text{a}}\right) \times \text{fp}$$

$$= \left(\frac{0{,}054\text{-}0{,}00003}{0{,}12531}\right) \times 20 = 0{,}431 \text{ ppm}$$

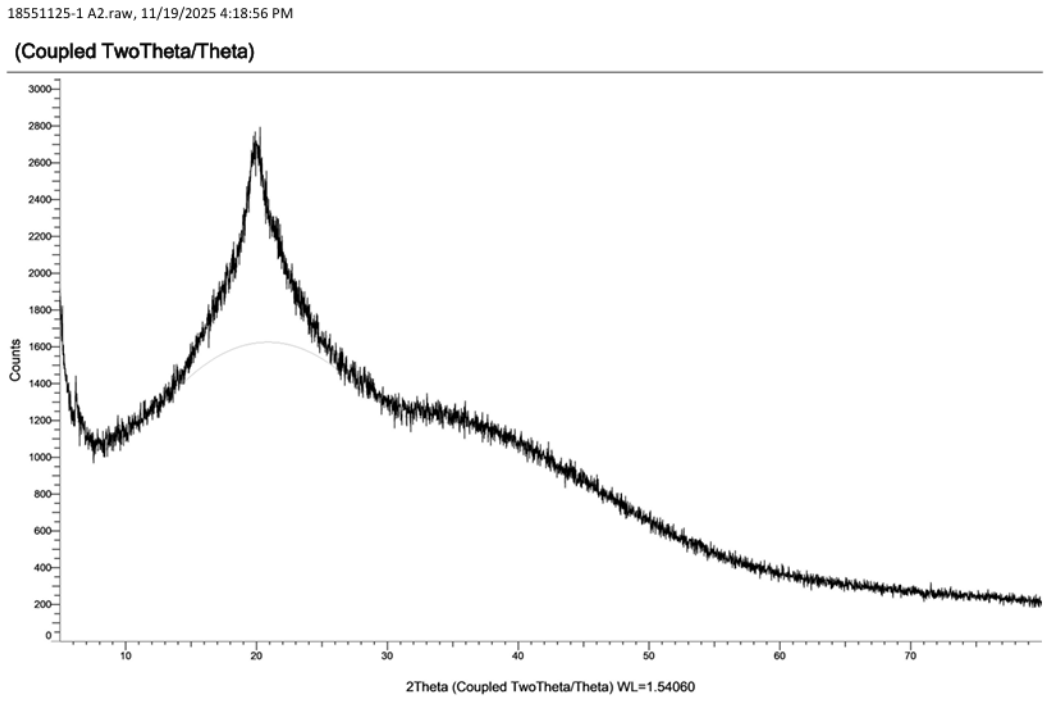
b. Perhitungan P_2O_5 Total (mg/100 gram)

$$\text{Kadar P Tersedia (ppm)} = \text{ppm kurva} \times \left(\frac{\text{ml ekstrak}}{1.000 \text{ ml}}\right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}}{\text{g contoh}}\right) \times \text{fp} \times \left(\frac{142}{190}\right) \times \text{fk}$$

$$= 0{,}431 \times \left(\frac{10}{1.000}\right) \times \left(\frac{1000}{1{,}111}\right) \times 20 \times \left(\frac{142}{190}\right) \times 1{,}04$$

$$= 6{,}03 \text{ mg/100 gram}$$

Lampiran 3 Hasil Uji XRD *Chitosan*



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian XRD Terhadap *Chitosan*

18551125-1 A2.raw, 11/19/2025 4:20:39 PM

Peak List #1

Visible	Icon	Color	Index	Name	Parent	Caption (display)	Scan	Angle
Yes			1	Peak #1	Peak List #1	6.197 °	18551125-1 A2.raw #1	6.197 °
Yes			2	Peak #2	Peak List #1	19.986 °	18551125-1 A2.raw #1	19.986 °

d Value	Net Intensity	Gross Intensity	Rel. Intensity	h,k,l	Match
14.25113 Å	228	1429	21.1%	n.a.	No
4.43899 Å	1081	2702	100.0%	n.a.	No

Gambar 4. *Peak List* Hasil Pengujian XRD Terhadap *Chitosan*

18551125-1 A2.raw, 11/19/2025 4:22:08 PM

Area List #1

Visible	Icon	Color	Index	Name	Parent	Scan	Left Angle	Right Angle
Yes			2	[6.119 ° - 6.485 °]	Area List #1	18551125-1 A2.raw #1	6.119 °	6.485 °
Yes			1	[10.487 ° - 30.454 °]	Area List #1	18551125-1 A2.raw #1	10.487 °	30.454 °

Left Int.	Right Int.	Obs. Max	d (Obs. Max)	Gross Int.	Net Height	FWHM	Chord Mid.	d (Chord Mid.)
18.4	18.1	6.197 °	14.25046 Å	22.0	3.63	0.084	6.204 °	14.23534 Å
17.8	19.3	19.993 °	4.43756 Å	42.1	23.5	4.383	20.189 °	4.39497 Å

I. Breadth	Gravity C.	d (Gravity C.)	Raw Area	Net Area	C. Size	K	Instr. Width	Use I. Breadth
0.118	6.247 °	14.13684 Å	7.100	0.4272	1057.7 Å	1.000	0.000	No
6.243	20.333 °	4.36411 Å	517.5	146.8	20.5 Å	1.000	0.000	No

Gambar 5. *Area List* Hasil Pengujian XRD Terhadap *Chitosan*

Lampiran 4 Dokumentasi Kegiatan



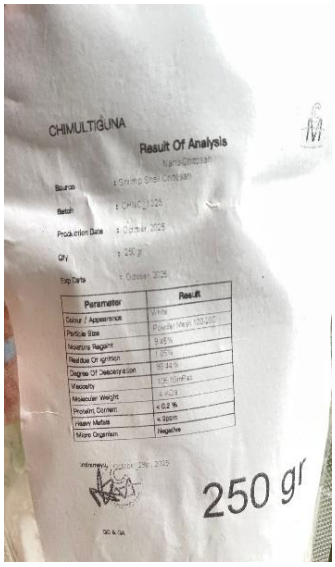
Gambar 6. Persiapan Sampel Tanah



Gambar 7. Kompos



Gambar 8. *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)



Gambar 9. C*hitosan*



Gambar 10. *Monitoring* Tanah *Landfarming*



Gambar 11. Penambahan Arang Sekam



Gambar 12. Penanaman Tanaman



Gambar 13. Penyiraman Tanaman



Gambar 14. Penyemprotan Insektida



Gambar 15. Pengukuran Tinggi Tanaman



Gambar 16. Pengukuran Diameter Tanaman



Gambar 17. Pemanenan Tanah



Gambar 18. Pemanenan Tanaman



Gambar 19. Penimbangan Jaringan Tanaman



Gambar 20. Sampel Tanah di Laboratorium



Gambar 21. Sampel Jaringan Tanaman di Laboratorium



Gambar 22. Proses Destruksi Asam Uji Logam Hg



Gambar 23. Hasil Destruksi Asam Uji Logam Hg



Gambar 24. Pembacaan Sampel Logam Hg di ICP-MS



Gambar 25. Proses Uji P



Gambar 26. Pembacaan Sampel P di Spektrofotometer UV-Vis

RIWAYAT HIDUP



Alya Melan Anggraini Suwae, lahir di Kotamobagu, 28 Juli 2004. Penulis merupakan anak pertama dari Bapak Dr. Habel Melkias Suwae, S.Sos., M.M., dan Ibu Anita Ampel. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 1 Kotamobagu dan SMP Katolik Theodorus Kotamobagu, kemudian melanjutkan pendidikan menengah di SMA Negeri 1 Manado.

Pada tahun 2022, penulis tercatat sebagai mahasiswa Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia (UII). Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis aktif berpartisipasi dalam kegiatan akademik maupun non-akademik. Pada kegiatan akademik, penulis berkesempatan menjadi asisten kuliah lapangan Ilmu Hayati dan Ilmu Kebumian, serta asisten laboratorium Praktikum Mikrobiologi Lingkungan. Penulis juga pernah berpartisipasi dalam berbagai seminar, salah satunya Seminar Nasional Teknik Lingkungan (SNTL) 2025 sebagai *co-author* dan *presenter* oral. Pada kegiatan non-akademik, penulis berpartisipasi dalam berbagai kepanitiaan dan organisasi di tingkat jurusan hingga universitas. Penulis tergabung dalam kepanitiaan Lintas Lingkungan 2023, PEKTA 2023, dan Envirofest 2024. Organisasi yang penulis ikuti meliputi EVIC, EDS UII, LEM FTSP UII, dan *Student Staff* Jurusan Teknik Lingkungan UII. Berbekalkan pengalaman dan kemampuan penulis, penulis berkesempatan menjadi *buddy* program pertukaran pelajar Jurusan Teknik Lingkungan UII untuk kegiatan *Sovoie Mont Blanc Summer Internship* 2023, serta *buddy* untuk universitas lainnya seperti *Tokyo University of Science* dan *The University of Rhode Island*.

Penulis memiliki rasa ingin tahu dan ketertarikan terhadap remediasi lingkungan sehingga penulis menyusun tugas akhir ini sebagai upaya meningkatkan pemahaman penulis dan syarat kelulusan di Program Studi Teknik Lingkungan UII. Penulis berharap tugas akhir yang disusun mampu memberikan manfaat dan kontribusi untuk sesama mahasiswa, akademisi, hingga masyarakat luas. Adapun kekurangan yang dimiliki oleh laporan ini sepenuhnya berasal dari keterbatasan penulis, oleh karena itu penulis amat terbuka untuk kritik dan diskusi konstruktif untuk perkembangan pemahaman dan kemampuan penulis.