TA/TL/2026/2116

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Investigasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) Dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) Dalam Memperbarui Kualitas Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat Di Yogyakarta

Ilham Akbar Mustikojati Prasojo
21513117

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

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2026

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Investigation of the Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Restoring Soil Quality in Artisanal Former Gold Mining Areas of Yogyakarta

Ilham Akbar Mustikojati Prasojo
21513117

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

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

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Investigation of the Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Restoring Soil Quality in Artisanal Former Gold Mining Areas of Yogyakarta

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

Ilham Akbar Mustikojati Prasojo

21513117

Tugas akhir ini telah diuji tanggal 8 Juni 2026 dan disetujui oleh:

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

Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech., M.Agr., Ph.D (Penguji 1)

Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T (Penguji 2) 22.07.26

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

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

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

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

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

Yogyakarta, 20 *Juli 2026*
Yang membuat pernyataan,



Ilham Akbar Mustikojati Prasojo
21513117

PRAKATA

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji dan syukur atas kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul "Peran Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) dan Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan Cabai (Capsicum frutescens L.) pada Lahan Bekas Tambang Emas di Desa Kalirejo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa".

Selama proses penyusunan tugas akhir ini, terdapat pihak-pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan kepada penulis. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan dan doa untuk kelancaran penulisan tugas akhir ini.

Dengan tulus hati, ucapan terima kasih ini disampaikan kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar.
2. Kedua orang tua dan seluruh keluarga besar penulis yang selalu memberikan do'a, kasih sayang, dan motivasi yang selalu mengiringi setiap langkah penulis.
3. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing, Ibu Annisa Nur Lathifah, S.Si., M.Biotech., M.Agr., Ph.D, dan Ibu Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah berkenan memberikan bimbingan dan masukan serta waktu dan kesempatan kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir.
4. Seluruh dosen di Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis.
5. Seluruh staff Laboratorium Teknik Lingkungan FTSP
6. Faiqoh Tsurayya, S.Farm ¡yang selalu menemani dan

memberikan dukungan, perhatian serta sudah menjadi tempat berkeluh kesah bagi penulis selama proses penyelesaian skripsi ini.

7. Teman-teman terdekat penulis yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan dan menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
8. Teman-teman TA Remediasi Tanah yang selalu mendukung penulis.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dan memiliki berbagai keterbatasan. Karena itu, penulis sangat mengharapkan adanya masukan maupun kritik yang bersifat membangun. Penulis juga berharap semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak.

Sleman, 20 Juli 2026

Ilham Akbar Mustikojati Prasojo

Investigasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) Dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) Dalam Memperbarui Kualitas Tanah Bekas Tambang Emas Rakyat Di Yogyakarta

Mahasiswa : Ilham Akbar Mustikojati Prasojo
NIM : 21513117
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

ABSTRAK

Lahan bekas tambang emas umumnya mengalami degradasi kualitas tanah serta berpotensi tercemar logam berat, terutama merkuri (Hg), sehingga memerlukan upaya rehabilitasi untuk memulihkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pemanfaatan mikroorganisme tanah seperti *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang berperan dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara serta membantu proses fitoremediasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kualitas tanah bekas tambang emas setelah perlakuan AMF dan PGPR serta menganalisis pengaruh inokulasi AMF dan PGPR terhadap pertumbuhan tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.). Penelitian dilakukan dalam kondisi terkendali di rumah kaca dengan menggunakan tanah bekas tambang emas yang berasal dari Desa Kalirejo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Perlakuan yang digunakan yaitu kombinasi kompos, sekam, AMF, dan PGPR (K2 + M + P) yang dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Parameter yang diamati meliputi *survival rate*, tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun, biomassa tanaman, kadar air tanah, kandungan P_2O_5 tanah, serapan P_2O_5 tanaman, serta konsentrasi merkuri (Hg) pada tanah dan jaringan tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman cabai yang ditunjukkan oleh peningkatan *survival rate* hingga 100%, serta peningkatan tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun pada fase awal pertumbuhan, dan biomassa tanaman dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Perlakuan tersebut juga mampu meningkatkan kandungan P_2O_5 tanah serta serapan P_2O_5 pada batang tanaman, yang mengindikasikan peran AMF dan PGPR dalam meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pemanfaatan fosfor pada tanah terdegradasi. Namun demikian, perlakuan tersebut belum menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap kadar air tanah. Selain itu, perlakuan K2 + M + P menunjukkan potensi dalam menurunkan konsentrasi Hg di tanah, meskipun kadar Hg masih berada di atas ambang batas aman. Akumulasi Hg pada jaringan tanaman menunjukkan variasi, dimana konsentrasi Hg pada batang tanaman lebih tinggi dibandingkan kontrol, sedangkan pada akar tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Secara keseluruhan, kombinasi kompos, sekam, AMF, dan PGPR berpotensi sebagai strategi biofitoremediasi untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman cabai serta memperbaiki kualitas tanah pada lahan bekas tambang emas. Namun demikian, optimalisasi perlakuan masih diperlukan untuk meningkatkan efektivitas dalam menekan akumulasi logam berat pada jaringan tanaman.

Kata kunci: AMF, PGPR, biofitoremediasi, lahan bekas tambang emas, merkuri (Hg), *Capsicum frutescens.*

The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Improving Soil Quality and Chili Pepper (Capsicum frutescens L.) Growth on Post-Gold Mining Land in Kalirejo Village, Kulon Progo Regency, Special Region of Yogyakarta.

Student : Ilham Akbar Mustikojati Prasojo
Student Number : 21513117
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D

ABSTRACT

Former gold mining areas generally experience soil quality degradation and are potentially contaminated by heavy metals, particularly mercury (Hg), thereby requiring rehabilitation efforts to restore soil fertility and support plant growth. One potential approach is the utilization of soil microorganisms such as Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), which play important roles in enhancing nutrient availability and facilitating phytoremediation processes. This study aimed to evaluate changes in the quality of former gold mining soil following the application of AMF and PGPR, and to analyze the effect of AMF and PGPR inoculation on the growth of chili pepper (Capsicum frutescens L.). The experiment was conducted under controlled greenhouse conditions using soil collected from a former gold mining site in Kalirejo Village, Kulon Progo Regency, Special Region of Yogyakarta. The treatment applied was a combination of compost, rice husk, AMF, and PGPR (K2 + M + P), which was compared with a control treatment. The observed parameters included survival rate, plant height, stem diameter, number of leaves, plant biomass, soil moisture content, soil P_2O_5 content, plant P_2O_5 uptake, and mercury (Hg) concentration in both soil and plant tissues. The results showed that the K2 + M + P treatment had a positive effect on the growth of chili plants, as indicated by an increase in survival rate up to 100%, as well as improvements in plant height, stem diameter, number of leaves during the early growth stage, and plant biomass compared to the control treatment. The treatment also increased soil P_2O_5 content and P_2O_5 uptake in plant stems, indicating the active role of AMF and PGPR in enhancing phosphorus availability and utilization efficiency in degraded soils. However, the treatment did not show a significant effect on soil moisture content. In addition, the K2 + M + P treatment demonstrated potential in reducing Hg concentration in soil, although the Hg levels remained above the safe threshold limit. Mercury accumulation in plant tissues showed variable results, where Hg concentration in plant stems was higher than that in the control treatment, while the difference in roots was minimal and not significant. Overall, the combination of compost, rice husk, AMF, and PGPR shows potential as a bio-phytoremediation strategy to improve chili plant growth and soil quality in former gold mining areas. Nevertheless, further optimization of the treatment is required to enhance its effectiveness in reducing heavy metal accumulation in plant tissues.

Key words: AMF, PGPR, biophytoremediation, former gold mining land, mercury (Hg), Capsicum frutesencs.

DAFTAR ISI

PRAKATA **3**

ABSTRAK **5**

DAFTAR ISI **1**

DAFTAR TABEL **4**

DAFTAR GAMBAR **5**

BAB I PENDAHULUAN **5**

1.1 Latar Belakang 5

1.2 Rumusan Masalah 6

1.3 Tujuan 6

1.4 Manfaat 6

1.5 Ruang Lingkup 7

BAB II **8**

TINJAUAN PUSTAKA **8**

2.2 Tambang Emas 8

2.3 Logam Berat 9

2.3.1 Merkuri (Hg) 10

2.3.2 Timbal (Pb) 10

2.3.3 Kadmium (cd) 10

2.3.4 Seng (Zn) 11

2.4 Sulfat 11

2.5 Remediasi Tanah 11

2.5.1 Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) 12

2.5.2 Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) 12

2.5.3 Kompos 12

2.5.4 Sekam 12
2.6 Nutrisi Tanah 13
2.6.1 P Dan K Tersedia Tanah (Fosfor Dan Kalium Tersedia) 13
2.6.2 P Dan K Total (Total Fosfor Dan Kalium) 13
2.7 Penelitian Terdahulu 14
BAB III 16
METODE PENELITIAN/PERENCANAAN 16
3.1 Waktu Dan Lokasi 16
3.2 Alat Dan Bahan 16
3.2.1 Alat 16
3.2.2 Bahan 18
3.3 Prosedur Analisis Data 19
3.3.1 Pengambilan Sampel Tanah 20
3.3.2 Persiapan Semai 20
3.3.3 Persiapan Media Tanam 20
3.3.4 Persiapan Kompos dan Sekam 21
3.3.5 Penanaman Semai 21
3.3.6 Inokulasi AMF 21
3.3.7 Inokulasi PGPR 21
3.3.8 Penyiraman Dan Pemeliharaan 21
3.3.9 Pengambilan Data Pertumbuhan 22
3.3.10 Panen Dan Pengambilan Sampel 22
3.4 Anallisis Labotarium 23
BAB IV 29
HASIL DAN PEMBAHASAN 29
4.1 Pengaruh Kombinasi Kompos, Sekam, AMF, Dan PGPR Terhadap Kualitas Tanah Dan Pertumbuhan Tanaman *Capsicum frutescens* L. 29

4.1.1 *Survival Rate* Tanaman *Capsicum frutescens* L. 29
4.1.2 Tinggi Tanaman 30
4.1.3 Diameter Tanaman 31
4.1.4 Daun Tanaman 31
4.1.5 Biomassa Tanaman 32
4.2 Pengaruh Kompos, Sekam, AMF, dan PGPR sebagai Media Mikroba terhadap Nutrisi 34
4.2.1 Kadar Air Tanah 34
4.2.2 Konsentrasi Sulfat 35
4.2.3 Konsentrasi P_2O_5 Tanah 36
4.2.4 Konsentrasi P_2O_5 Batang 37
4.3 Pengaruh Kompos, Sekam, AMF dan PGPR sebagai Media Mikroba terhadap Logam Berat 38
4.3.1 Konsentrasi Logam Hg Tanah 38
4.3.2 Konsentrasi Logam Hg Batang 39
4.3.3 Konsentrasi Logam Hg Akar 40
BAB V 42
PENUTUP 42
5.1 Kesimpulan 42
5.2 Saran 42
DAFTAR PUSTAKA 44
LAMPIRAN 47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Penelitian Terdahulu 14
Tabel 3.1 Alat 16
Tabel 3.2 Bahan 18
Tabel 4.1 *Survival rate* 30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Tahapan penelitian 19
Gambar 3. 2 Lokasi penelitian 20
Gambar 3. 3 Biomassa (berat kering) 22
Gambar 3. 4 Biomassa (berat basah) 23
Gambar 3. 5 Pengujian kadar air tanah 24
Gambar 3. 6 Pengujian konsentrasi sulfat 25
Gambar 3. 7 Pengujian fosfor (P_2O_5) tanah 26
Gambar 3. 8 Pengujian fosfor (P_2O_5) tanaman 27
Gambar 3. 9 Pengujian Hg (tanah,batang,akar) 28
Gambar 4.1 Tingggi tanaman 30
Gambar 4.2 Diameter tanaman 31
Gambar 4.3 Daun tanaman 32
Gambar 4.4 Biomassa tanaman 33
Gambar 4.5 Kadar air tanah 35
Gambar 4.6 Konsentrasi sulfat 36
Gambar 4.7 Konsentrasi P2O5 tanah 37
Gambar 4.8 Konsentrasi P2O5 batang 38
Gambar 4.9 Konsentrasi logam Hg tanah 39
Gambar 4.10 Konsentrasi logam Hg batang 40
Gambar 4.11 Konsentrasi logam Hg akar 41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi kegiatan sampling 47
Lampiran 2. Dokumentasi kegiatan penanaman..... 48
Lampiran 3. Dokumentasi kegiatan perawatan tanaman..... 49
Lampiran 4. Dokumentasi tanaman sebelum dan sesudah panen..... 50
Lampiran 5. Dokumentasi laboratorium..... 51

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambangan emas merupakan salah satu kegiatan ekstraktif yang memberikan kontribusi ekonomi, namun juga meninggalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu dampak yang paling nyata adalah degradasi lahan, baik secara fisik, kimia, maupun biologi. Lahan bekas tambang emas umumnya mengalami penurunan kualitas tanah, ditandai dengan rendahnya kandungan bahan organik, terbatasnya ketersediaan unsur hara, rendahnya kapasitas tukar kation, serta tingginya kandungan logam berat yang bersifat toksik. Kondisi ini menyebabkan tanah menjadi marginal bahkan tidak produktif bagi pertumbuhan tanaman (Ma dkk., 2022)

Urgensi pemulihan lahan pascatambang semakin meningkat seiring bertambahnya luas area terdegradasi di Indonesia, sementara proses reklamasi masih menghadapi kendala biaya yang tinggi dan keterbatasan teknologi di tingkat masyarakat. Hal ini menuntut solusi yang lebih efektif, berkelanjutan, dan murah, terutama melalui pendekatan biologis yang dapat diterapkan secara langsung oleh masyarakat sekitar tambang. Dalam beberapa tahun terakhir, fitoremediasi berkembang sebagai pendekatan ramah lingkungan untuk memperbaiki kualitas tanah tercemar, namun keberhasilannya sangat bergantung pada keberadaan mikroorganisme tanah yang mampu meningkatkan daya tumbuh tanaman pada kondisi tanah yang miskin hara. Kebaruan penelitian ini diperkuat dengan penggunaan bahan organik seperti kompos dan sekam yang berfungsi memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas retensi air, serta mendukung perkembangan komunitas mikroba bermanfaat. Upaya perbaikan lahan pascatambang sangat penting dilakukan agar lahan dapat kembali berfungsi secara ekologis maupun produktif. Salah satu pendekatan yang mulai banyak dikembangkan adalah fitoremediasi, yaitu pemanfaatan tanaman dalam memperbaiki kualitas tanah tercemar. Namun, keberhasilan fitoremediasi sangat dipengaruhi oleh kesuburan tanah dan ketersediaan mikroba tanah yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman (Tamma dkk., 2025)

Dalam konteks ini, *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) menjadi agen biologi potensial. AMF mampu meningkatkan penyerapan hara, khususnya fosfor, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman

lingkungan. Sementara itu, PGPR diketahui dapat menghasilkan fitohormon, melarutkan fosfat, menekan patogen akar, dan meningkatkan pertumbuhan tanaman. Kombinasi AMF dan PGPR diyakini mampu menciptakan sinergi yang lebih baik dalam mendukung pertumbuhan tanaman di lahan terdegradasi (Pradhan dkk., 2025)

Sebagai tanaman uji, cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) dipilih karena memiliki nilai ekonomi tinggi, toleransi terhadap berbagai kondisi lingkungan, serta respons yang baik terhadap inokulasi mikroba tanah. Penanaman cabai dengan bantuan AMF dan PGPR diharapkan tidak hanya mendukung perbaikan kualitas tanah bekas tambang emas, tetapi juga memberikan manfaat produktif secara ekonomi bagi masyarakat sekitar (Ma dkk., 2022)

Berdasarkan uraian tersebut, Kebaruan penelitian ini diperkuat dengan penggunaan bahan organik seperti kompos dan sekam yang berfungsi memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas retensi air, serta mendukung perkembangan komunitas mikroba bermanfaat. Penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi potensi kombinasi AMF dan PGPR pada tanaman cabai dalam mendukung remediasi tanah bekas tambang emas di Desa Kalirejo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

1.2 Rumusan Masalah

1) Bagaimana peran inokulasi AMF dan PGPR terhadap pertumbuhan tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.) pada tanah bekas tambang emas?
2) Apakah kombinasi AMF dan PGPR mampu meningkatkan kualitas tanah bekas tambang emas dibandingkan tanpa perlakuan?

1.3 Tujuan

1) Mengevaluasi perubahan kualitas tanah bekas tambang emas setelah perlakuan AMF dan PGPR.
2) Menganalisis pengaruh inokulasi AMF dan PGPR terhadap pertumbuhan tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.) pada tanah bekas tambang emas.

1.4 Manfaat

1) Secara Teoritis

   Mengembangkan pemahaman tentang peran sinergis AMF dan PGPR dalam fitoremediasi logam berat pada tanaman hortikultura.

2) Secara Praktis

   Menawarkan teknologi biofitoremediasi yang *cost-effective* bagi tanah terdegradasi.

   Mendorong pengembangan pertanian berkelanjutan dengan nilai ekonomi, khususnya

budidaya cabai di lahan bekas tambang.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1) Pertumbuhan tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.) akan dipantau dalam kondisi terkendali menggunakan rumah kaca.
2) Tanaman yang digunakan adalah tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.) untuk menguji pengaruh AMF dan PGPR terhadap pertumbuhannya.
3) Pengamatan dilakukan untuk menilai pengaruh penggunaan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap pertumbuhan tanaman cabai di tanah bekas tambang emas.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanaman Cabai *(Capsicum frutescens L.)*

Cabai rawit *(Capsicum frutescens L.)* merupakan salah satu komoditas hortikultura penting di Indonesia. Tanaman ini kaya akan senyawa bioaktif seperti capsaicin, flavonoid, dan vitamin C yang bermanfaat bagi kesehatan. Namun, produktivitas cabai sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah, ketersediaan unsur hara, serta adanya cekaman lingkungan (Ahmad Nazari dkk., 2023).

Selain perannya dalam aspek konsumsi, cabai rawit juga memiliki arti strategis bagi sektor pertanian dan perekonomian nasional. Permintaan pasar terhadap cabai rawit cenderung meningkat seiring pertumbuhan jumlah penduduk dan kebutuhan industri, namun produktivitasnya sering mengalami fluktuasi karena keterbatasan lahan, serangan organisme pengganggu tanaman, serta kondisi tanah yang kurang subur. Oleh karena itu, upaya peningkatan produktivitas melalui perbaikan kualitas tanah dan penerapan teknologi budidaya berkelanjutan sangat diperlukan agar cabai rawit tetap mampu memenuhi kebutuhan domestik secara konsisten (Sofiarani & Ambarwati, 2020)

2.2 Tambang Emas

Desa Kalirejo yang terletak di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, merupakan salah satu wilayah yang sejak lama dikenal sebagai lokasi penambangan emas rakyat. Aktivitas penambangan ini terutama terpusat di Dusun Plampang I, Plampang II, dan Papak, dengan luas wilayah penambangan mencapai kurang lebih seratus hektar. Penambangan dilakukan secara tradisional dengan peralatan sederhana dan menggunakan bahan kimia seperti merkuri untuk memisahkan emas dari bijihnya (Santoso & Gomareuzzaman, 2022).

Penambangan emas di Kalirejo mulai banyak masyarakat lokal beralih profesi menjadi penambang karena potensi keuntungan yang menjanjikan. Namun, ketika hasil tambang mulaberkurang, banyak pemilik lahan menyewakan tanah mereka kepada penambang dari luar daerah. Perubahan ini menimbulkan ketegangan sosial, baik antarwarga maupun antara masyarakat dengan pemerintah daerah, terutama terkait status hukum dan pengelolaan Pertambangan Emas Tanpa Izin (PETI) (An' Amta, 2023).

Selain dampak sosial, kegiatan penambangan emas juga menimbulkan masalah lingkungan yang serius. Proses amalgamasi dengan merkuri mengakibatkan pencemaran tanah dan air di sekitar wilayah tambang. Dan terdapat kadar merkuri pada air tanah di Kalirejo telah

melampaui ambang batas yang diperbolehkan, yaitu 0,002–0,022 mg/L dibanding baku mutu 0,0016 mg/L. Temuan ini membuktikan bahwa aktivitas penambangan memberikan dampak langsung terhadap kesehatan masyarakat dan kualitas lingkungan (Tamma dkk., 2025).

Kondisi tanah bekas tambang emas di Kalirejo saat ini ditandai oleh rendahnya kandungan bahan organik, rendahnya kapasitas tukar kation, pH tanah yang cenderung asam, serta tingginya konsentrasi logam berat seperti Hg, Pb, Cd, dan Zn. Faktor-faktor tersebut menjadikan lahan pasca-tambang kurang subur, sulit ditanami, dan membutuhkan upaya remediasi untuk mengembalikan produktivitasnya (Tamma dkk., 2025).

2.3 Logam Berat

Logam berat adalah unsur logam yang memiliki massa jenis lebih dari 5 g/cm³ serta bersifat toksik terhadap organisme hidup walaupun dalam konsentrasi rendah. Keberadaan logam berat di lingkungan sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia seperti industri, pembakaran bahan bakar fosil, serta pertambangan. Pada kawasan tambang emas rakyat, logam berat muncul dari proses pelapukan mineral sulfida dan penggunaan bahan kimia ekstraksi, sehingga terakumulasi di tanah, air, maupun udara (Jaishankar dkk., 2014).

Sifat khas logam berat adalah persisten (sulit terurai), toksik (berbahaya bagi organisme), dan bioakumulatif (mudah menumpuk di jaringan organisme). Karakter ini membuat logam berat menjadi polutan yang sangat berbahaya dalam jangka panjang. Pada tanah, akumulasi logam berat mengganggu keseimbangan kimia, menurunkan aktivitas mikroorganisme, serta mengurangi ketersediaan unsur hara esensial (Riyazuddin dkk., 2022).

Pada tanaman, keberadaan logam berat dapat menghambat proses fotosintesis, respirasi sel, serta mengganggu penyerapan nutrisi. Gejala keracunan logam berat pada tanaman biasanya ditandai dengan klorosis, pertumbuhan akar yang terhambat, serta penurunan hasil panen. Logam berat yang paling sering terdeteksi pada lahan bekas tambang emas adalah merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan seng (Zn). Keempat logam ini bersifat persisten (tidak mudah terurai), bioakumulatif (mudah menumpuk di jaringan organisme), dan toksik baik bagi tanaman maupun manusia. Pengukuran kadar logam berat juga pada jaringan tanaman, khususnya akar dan batang, untuk mengetahui mekanisme serapan, translokasi, dan akumulasi logam. (Wu dkk., 2016)

Tanah merupakan media utama tempat logam berat terakumulasi, baik dari limbah industri, pupuk, pestisida dan Tambang, maupun deposisi atmosfer. Kandungan logam dalam tanah menentukan ketersediaan logam bagi tanaman. Faktor yang memengaruhi bioavailabilitas logam antara lain pH, kandungan bahan organik, tekstur, dan kapasitas tukar kation (CEC) (Haghighizadeh dkk., 2024).

2.3.1 Merkuri (Hg)

Merkuri merupakan logam berat yang paling banyak digunakan dalam proses penambangan emas rakyat di Desa Kalirejo. Proses amalgamasi emas dengan merkuri meninggalkan sisa merkuri yang masuk ke dalam tanah, air permukaan, dan air tanah. Merkuri bersifat sangat toksik karena mudah berubah bentuk menjadi metilmerkuri, senyawa yang larut dalam air dan mudah masuk ke rantai makanan. Pada tanaman, merkuri dapat mengganggu proses fotosintesis, merusak membran sel, dan menurunkan aktivitas enzim (Agustiani dkk., 2025).

Penelitian menunjukkan bahwa paparan merkuri dapat menyebabkan gangguan pertumbuhan dan menurunkan hasil panen tanaman pangan. Dampaknya tidak hanya berbahaya bagi tanaman, tetapi juga dapat berpindah ke hewan dan manusia melalui konsumsi. Oleh karena itu, merkuri dikategorikan sebagai salah satu polutan prioritas yang harus dikendalikan, khususnya pada ekosistem pertanian di sekitar tambang emas rakyat (Mei dkk., 2021)

2.3.2 Timbal (Pb)

Timbal atau plumbum (Pb) adalah logam berat yang bersifat non-esensial bagi tanaman dan sangat toksik jika terakumulasi dalam jumlah tinggi. Pada tanah bekas tambang emas, Pb berasal dari pelapukan mineral sulfida maupun sisa proses pengolahan bijih. Akumulasi Pb di tanah dapat mengganggu keseimbangan unsur hara, menghambat fotosintesis, serta menurunkan pertumbuhan akar dan daun cabai (Bouida dkk., 2022)

Selain itu, Pb yang masuk ke dalam sel tanaman dapat mengganggu fungsi enzim dan proses fotosintesis, sehingga menyebabkan klorosis dan nekrosis pada daun. Pb juga dapat mengurangi biomassa akar dan daun, yang akhirnya berpengaruh pada hasil panen. Kehadiran Pb di tanah pertanian sangat berisiko karena logam ini bersifat persisten dan mudah masuk ke rantai makanan melalui hasil panen (Salam dkk., 2022)

2.3.3 Kadmium (cd)

Kadmium adalah logam berat yang sangat beracun meskipun dalam konsentrasi rendah. Di tanah tambang emas, Cd sering berasal dari mineral sulfida dan dapat terbawa bersama limbah tailing. Kadmium mudah diserap akar tanaman dan ditranslokasikan ke bagian vegetatif maupun generatif, termasuk buah cabai. Hal ini menimbulkan risiko serius karena Cd bersifat bioakumulatif dalam rantai makanan (Lu dkk., 2022).

` Beberapa penelitian menunjukkan bahwa Cd dapat mengganggu metabolisme tanaman dengan merusak struktur kloroplas, menghambat fotosintesis, serta memicu produksi radikal bebas. Dampak jangka panjangnya adalah penurunan hasil panen, kualitas buah, serta peningkatan risiko pencemaran rantai makanan. Oleh karena itu, remediasi Cd di tanah bekas tambang menjadi prioritas utama untuk mencegah pencemaran lebih lanjut.

2.3.4 Seng (Zn)

Seng merupakan unsur mikro esensial bagi tanaman karena berperan dalam aktivitas enzim, sintesis protein, dan pembelahan sel. Namun, pada tanah bekas tambang emas, konsentrasi Zn seringkali sangat tinggi akibat pelapukan mineral sulfida, sehingga menimbulkan efek toksik. Pada tanaman, kadar Zn yang berlebihan dapat menurunkan aktivitas enzim, menyebabkan klorosis, serta menghambat pertumbuhan akar (Broadley dkk., 2007)

Meski bersifat esensial, akumulasi Zn di atas ambang batas akan mengganggu homeostasis tanaman. Kondisi ini dapat mengurangi hasil panen cabai dan memengaruhi kualitas buah. Oleh karena itu, Zn pada tanah bekas tambang perlu dikendalikan agar tetap berada pada kadar optimal, sehingga fungsinya sebagai unsur mikro tetap bermanfaat tanpa menimbulkan efek toksik (Forand dkk., 2022).

2.4 Sulfat

Sulfat merupakan bentuk utama sulfur yang tersedia bagi tanaman di dalam tanah. Unsur sulfur termasuk makronutrien esensial yang berperan dalam penyusunan asam amino, protein, enzim, serta vitamin. Kandungan sulfat di tanah sangat dipengaruhi oleh bahan induk, kandungan bahan organik, aktivitas mikroba, serta kondisi lingkungan seperti pH dan kelembaban. Pada tanah yang miskin bahan organik, terutama pada lahan tambang atau tanah terdegradasi, konsentrasi sulfat biasanya rendah sehingga dapat membatasi pertumbuhan tanaman (*Washington State University Extension*, 2014)

Ketersediaan sulfat penting untuk mendukung metabolisme tanaman, meningkatkan ketahanan terhadap cekaman, dan menunjang kualitas hasil panen. Namun, keberadaan sulfat dalam jumlah berlebih, misalnya akibat oksidasi mineral sulfida di tanah tambang, dapat meningkatkan keasaman tanah (*acid mine drainage*) yang berdampak negatif pada kesuburan tanah. Oleh karena itu, analisis kandungan sulfat pada tanah perlu dilakukan untuk menilai status kesuburan sekaligus potensi risiko lingkungan (Briglia dkk., 2019)

2.5 Remediasi Tanah

Remediasi tanah merupakan upaya memperbaiki kualitas dan fungsi tanah yang terdegradasi, seperti oleh pencemaran logam berat, dengan cara aman dan lestari. Pendekatan ekologis menggunakan bahan organik dan mikroba fungsional menjadi strategi utama dalam memulihkan kesuburan serta menurunkan toksisitas kontaminan pada tanaman dan lingkungan (Zheng dkk., 2024).

Pendekatan ekologis juga melibatkan mikroba fungsional, seperti *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR), yang berperan dalam meningkatkan serapan hara, memperbaiki kesehatan tanah, serta menurunkan toksisitas

logam berat pada tanaman. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi bahan organik dan mikroba dapat secara signifikan memperbaiki pertumbuhan tanaman di lahan tercemar logam, sekaligus mengurangi akumulasi logam pada jaringan tanaman (Nyong dkk., 2020).

2.5.1 *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR)

PGPR adalah bakteri yang hidup di rizosfer dan mendukung pertumbuhan tanaman lewat hormon, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, serta kemampuan remediasi logam berat lewat biosorpsi dan akumulasi (Chen dkk., 2023).

PGPR juga berfungsi mengurangi efek toksisitas logam berat dengan menghasilkan siderofor dan eksopolisakarida (EPS) yang dapat mengikat ion logam. Aplikasi PGPR pada tanah tercemar terbukti meningkatkan pertumbuhan tanaman sekaligus memperbaiki kualitas tanah secara biologis (Backer dkk., 2018)

2.5.2 *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF)

AMF membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, memperluas luas penyerapan nutrisi, meningkatkan ketahanan terhadap logam berat, serta memperbolehkan pemulihan struktur tanah melalui glomalin (Farhad dkk., 2024).

AMF juga berperan dalam remediasi tanah tercemar logam berat. Fungi ini dapat mengurangi akumulasi logam beracun dalam jaringan tanaman dengan mengendapkannya di hifa atau akar. Dengan demikian, AMF tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tanaman pada tanah suboptimal, tetapi juga berkontribusi pada perbaikan ekosistem tanah yang terdegradasi (Farhad dkk., 2024)

2.5.3 Kompos

Kompos adalah hasil dekomposisi bahan organik, kaya akan nutrisi (N, P, K), humus, dan mikroorganisme menguntungkan. Aplikasi kompos memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aerasi, retensi air, serta merangsang aktivitas mikroba (Thiyageshwari dkk., 2018). Kompos juga bermanfaat dalam meningkatkan aktivitas mikroba tanah yang berperan penting dalam siklus hara. Dengan demikian, kompos mampu memperbaiki kualitas tanah secara berkelanjutan dan mendukung pertumbuhan tanaman hortikultura seperti cabai pada lahan marginal maupun bekas tambang (Indriyani & Darlis, 2024).

2.5.4 Sekam

Sekam (*Rice husk*) dan biochar yang dihasilkan sangat efektif dalam meningkatkan kesuburan tanah dan membantu remediasi logam berat. *Biochar* dari sekam padi dapat mengimobilisasi logam seperti Cd dan Pb, serta mendukung komunitas mikroba yang bermanfaat (Tamma dkk., 2025). Sekam padi juga berperan dalam mengurangi kepadatan tanah dan menjaga kelembaban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi sekam pada tanah

miskin bahan organik meningkatkan pertumbuhan tanaman sayuran dan hortikultura. Pemanfaatan sekam di lahan bekas tambang berpotensi besar untuk memperbaiki struktur tanah dan mendukung sistem perakaran tanaman cabai (Bimasri & Murniati, 2024).

2.6 Nutrisi Tanah

2.6.1 P Dan K Tersedia Tanah (Fosfor Dan Kalium Tersedia)

Fosfor (P) dan Kalium (K) tersedia tanah adalah bagian dari unsur hara yang dapat diserap langsung oleh tanaman dalam bentuk ion. Fosfor tersedia biasanya hadir sebagai ion ortofosfat ($H_2PO_4^-$ dan HPO_4^{2-}), sedangkan kalium tersedia hadir dalam bentuk ion K^+ yang larut dalam air atau mudah ditukar pada kompleks koloid tanah. Ketersediaan P dan K di tanah dipengaruhi oleh tekstur, pH, kandungan bahan organik, serta aktivitas mikroba. Pada tanah bekas tambang, P dan K tersedia sering rendah karena hilangnya lapisan topsoil dan dominasi mineral kasar yang miskin hara (Yihune & Addisu, 2024).

Ketersediaan P sangat penting bagi pembentukan energi (ATP), proses fotosintesis, serta pertumbuhan akar, sementara K mendukung pengaturan osmotik, transport fotosintat, dan ketahanan tanaman terhadap cekaman. Oleh karena itu, pengukuran P dan K tersedia digunakan sebagai indikator kesuburan tanah dan dasar untuk menentukan kebutuhan pemupukan. Peningkatan ketersediaan unsur ini dapat dilakukan dengan pemupukan anorganik maupun penambahan bahan organik yang memperbaiki retensi hara (Wei dkk., 2025).

2.6.2 P Dan K Total (Total Fosfor Dan Kalium)

P dan K total menggambarkan jumlah keseluruhan fosfor dan kalium yang terdapat di dalam tanah atau jaringan tanaman, baik dalam bentuk yang tersedia maupun yang terikat. Nilai P total pada batang mencerminkan efisiensi penyerapan dan distribusi fosfor dalam tubuh tanaman, sedangkan K total menunjukkan kapasitas penyimpanan kalium yang penting untuk pengaturan kekuatan jaringan batang (Amgain dkk., 2022).

Pada P dan K total mencakup seluruh cadangan unsur tersebut yang dapat dimobilisasi dalam jangka panjang. Informasi mengenai P dan K total pada jaringan tanaman sangat berguna untuk mengevaluasi status nutrisi, efektivitas pemupukan, serta potensi hasil tanaman. Pada lahan marginal atau pasca tambang, kandungan P dan K total pada batang sering kali lebih rendah dibanding tanah subur, sehingga diperlukan strategi manajemen hara untuk meningkatkan akumulasi unsur ini dalam jaringan tanaman.(Liu dkk., 2024).

2.7 Penelitian Terdahulu

penelitian terdahulu adalah kumpulan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan topik penelitian yang sedang dilakukan. Keberadaan studi ini berfungsi untuk memberikan dasar teoritis, memperkuat argumen penelitian, serta menunjukkan posisi penelitian yang sedang dilaksanakan dalam konteks keilmuan yang lebih luas. Dengan menelaah penelitian terdahulu, peneliti dapat mengidentifikasi temuan-temuan penting, melihat kelemahan maupun keterbatasan yang ada, serta menemukan celah (*research gap*) yang bisa dikembangkan lebih lanjut. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang relevan sebagai acuan yang disajikan pada (**Tabel 2.1)**

Tabel 2.1 Studi Penelitian Terdahulu

No	Penulis & Tahun	Topik Penelitian	Hasil Utama
1	(Thiyageshwari dkk., 2018)	Pemanfaatan kompos sekam padi pada tanah pertanian	Kompos sekam padi meningkatkan kesuburan tanah, ketersediaan nutrisi, dan hasil panen *Vigna mungo* (kacang hitam).
2	Ullah dkk., 2024	Aplikasi sekam padi untuk remediasi tanah tercemar logam berat	Sekam padi menurunkan bioavailabilitas Pb, Cd, dan Zn hingga 40–100%, serta meningkatkan keamanan pangan.
3	Chen dkk., 2023	Kombinasi PGPR dan AMF pada padi	Kombinasi PGPR + AMF meningkatkan kesuburan tanah, biomassa tanaman, dan efisiensi penyerapan hara.
4	Jiao dkk., 2024	Remediasi tanah terkontaminasi Pb, Zn, Cd dengan tanaman dan mineral illite	*Co-cropping* + mineral illite efektif menurunkan kandungan logam berat di tanah dan memperbaiki kualitas tanaman.
5	Pribadi dkk., 2025	Kontaminasi merkuri (Hg) di tambang emas Pongkor, Indonesia	Paparan merkuri tinggi di tanah dan air meningkatkan risiko kesehatan masyarakat sekitar tambang emas.
6	Ahmed dkk., 2022	Review kontaminasi kadmium (Cd) dan timbal (Pb) di tanah	Cd dan Pb bersifat toksik, menurunkan kesuburan tanah, dan bersifat karsinogenik; remediasi dapat dilakukan dengan biochar, fitoremediasi, dan mikroba.
7	Subramani dkk., 2023	Peran AMF dalam toleransi tanaman terhadap logam berat	AMF meningkatkan ketahanan tanaman terhadap Cd dan Pb dengan memperluas serapan hara dan mengikat logam berat di akar.
8	Kumar dkk, 2022	PGPR dalam remediasi tanah tercemar logam berat	PGPR mampu menurunkan ketersediaan logam berat dengan mekanisme biosorpsi dan produksi siderofor, serta meningkatkan pertumbuhan tanaman cabai.

Berdasarkan tabel penelitian terdahulu, terlihat bahwa berbagai pendekatan telah dilakukan untuk memperbaiki tanah yang tercemar logam berat. Penelitian yang memanfaatkan bahan organik seperti kompos dan sekam padi menunjukkan adanya peningkatan kualitas tanah serta berkurangnya ketersediaan logam berat berbahaya bagi tanaman (Thiyageshwari dkk., 2018).

Selain itu, penelitian lain yang melibatkan mikroba tanah seperti PGPR dan AMF membuktikan bahwa agen biologis berperan penting dalam meningkatkan serapan hara, mendukung pertumbuhan tanaman, dan mengurangi toksisitas logam berat. Beberapa penelitian juga menekankan pentingnya kombinasi antara bahan organik dengan agen biologis untuk mencapai hasil yang lebih efektif dalam remediasi tanah (Chen dkk., 2023).

Penelitian terdahulu di Indonesia menguatkan bahwa lahan bekas tambang emas memang berisiko tinggi terhadap pencemaran logam berat seperti merkuri, sehingga diperlukan strategi pemulihan yang ramah lingkungan. Dengan demikian, penelitian yang mengintegrasikan penggunaan kompos, sekam padi, PGPR, dan AMF pada tanaman cabai di lahan bekas tambang emas di Desa Kalirejo, Kulon Progo, memiliki dasar ilmiah yang kuat serta berpotensi memberikan solusi nyata terhadap permasalahan lingkungan dan pertanian berkelanjutan (Agustiani dkk., 2025).

BAB III
METODE PENELITIAN/PERENCANAAN

3.1 Waktu Dan Lokasi

Kegiatan penanaman semai cabai rawit dilaksanakan pada bulan Maret 2025. Penelitian ini dilakukan di rumah kaca dengan tahapan meliputi persiapan media tanam, penyemaian, penanaman, pemeliharaan, hingga proses panen. Rumah kaca penelitian berlokasi di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta (7°41'40.6"LS 110°25'38.6"BT).

Sampel tanah yang digunakan berasal dari area bekas tambang emas tradisional di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Analisis kandungan logam berat merkuri (Hg) dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Sementara itu, analisis mikrobiologi tanah dalam kaitannya dengan pertumbuhan mikroba dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

3.2 Alat Dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu.

Tabel 3.1 Alat

No	Alat	Kegunaan
1	Polybag plastik hitam (lokal, ukuran ±30 × 30 cm)	Wadah media tanam untuk pertumbuhan tanaman cabai.
2	Timbangan analitik *Ohaus Pioneer* PA214	Mengukur massa bahan secara presisi (tanah, kompos, sekam, pupuk).
3	Timbangan kasar Camry EK5055 *Digital Scale*	Menimbang bahan dalam jumlah besar (tanah, sekam, kompos).
4	Oven pengering *Memmert* UN55 Universal Oven	Mengeringkan sampel tanah, tanaman, atau bahan organik sebelum analisis.
5	Ayakan tanah *Endecotts Test Sieve* (mesh 2 mm)	Menyaring tanah agar homogen.

No	Alat	Kegunaan
6	Sekop/cangkul kecil (alat kebun *stainless steel* – lokal)	Mengambil, mencampur, dan memindahkan tanah.
7	Sprayer tangan *Krisbow Hand Sprayer* 1 L	Menyemprotkan air atau larutan mikroba (PGPR/AMF).
8	Ember & wadah plastik (lokal, kapasitas ±10–20 L)	Tempat pencampuran tanah dengan perlakuan (kompos, sekam, inokulum).
9	Gelas ukur dan *pipet Pyrex Measuring Cylinder* 100 mL & *Transfer Pipette*	Mengukur volume air atau larutan perlakuan.
10	Jangka sorong/Meteran *Mitutoyo Vernier Caliper* 530 *Series* dan meteran *Stanley* 3 m	Mengukur tinggi tanaman dan diameter batang.
11	Label plastik	Memberi kode perlakuan pada pot/polybag.
12	Spektrofotometer *UV-Vis Shimadzu* UV-1800	Menganalisis unsur hara atau logam berat terlarut.
13	*Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS)	Mengukur kandungan logam berat (Hg, Pb, Cd, Zn) dalam tanah.
14	Inkubator mikroba *Memmert* IN55 Incubator	Mengkultur dan mengembangbiakkan PGPR sebelum diaplikasikan.
15	Autoklaf Hirayama HVE-50 *Autoclave*	Mensterilkan media dan peralatan mikrobiologi.
16	Lemari asam ESCO *Frontier Fume Hood*	Menjaga dari paparan uap dan gas berbahaya yang dihasilkan dari reaksi kimia.
17	Petri dish dan tabung reaksi *Pyrex Glassware*	Media kultur mikroba (PGPR dan AMF).
18	Erlenmeyer, *beaker glass*, labu ukur *Pyrex Laboratory Glassware*	Persiapan larutan uji laboratorium.

3.2.2 Bahan

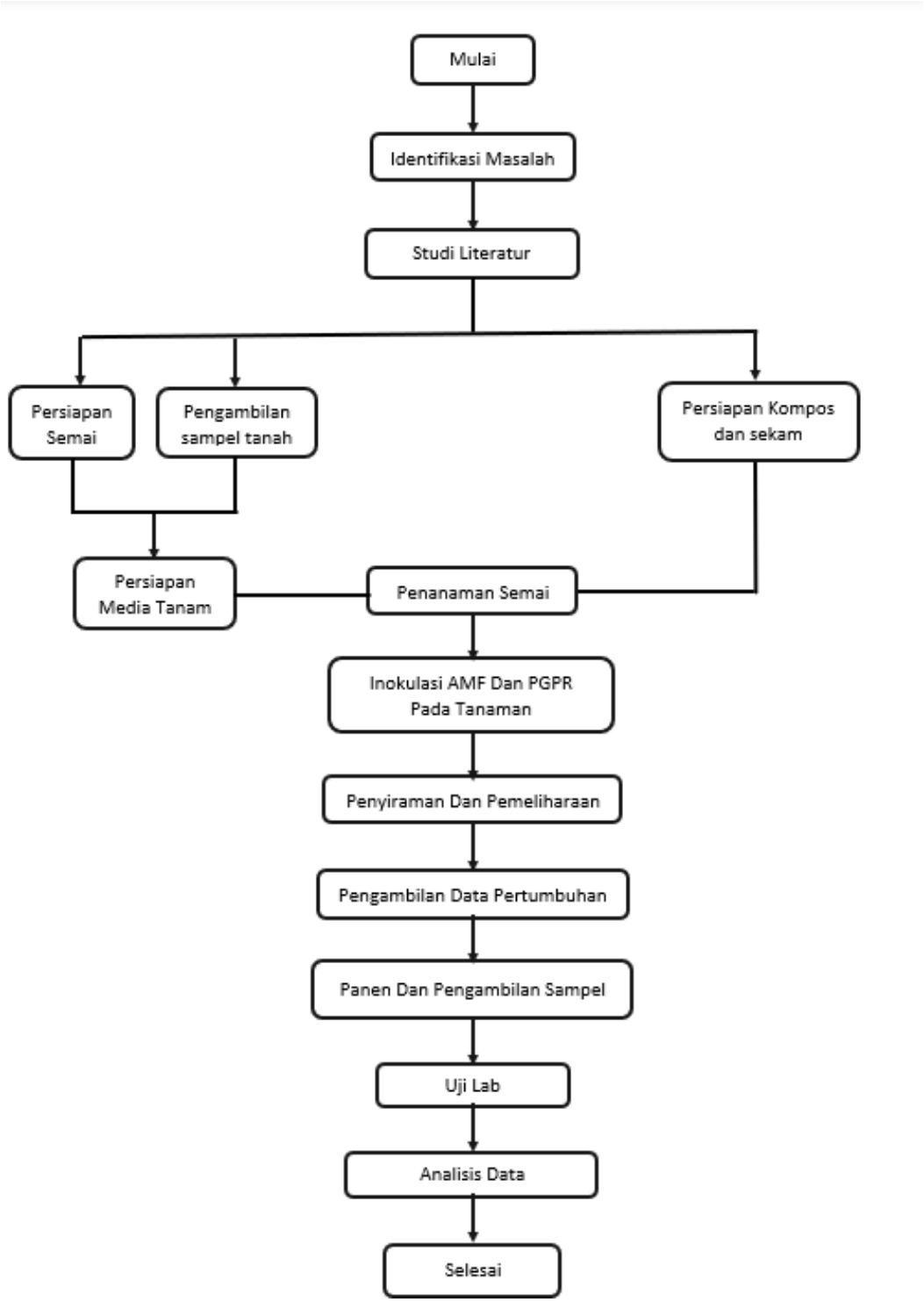
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

Tabel 3.2 Bahan

No	Bahan	Kegunaan
1	Tanah bekas tambang emas.	Media utama penelitian yang terkontaminasi logam berat.
2	Bibit cabai rawit (*Capsicum frutescens L.*)	Objek tanaman uji pada percobaan.
3	Kompos	Bahan organik untuk meningkatkan kesuburan dan kualitas tanah.
4	Sekam padi (mentah/terbakar)	Amelioran untuk memperbaiki struktur tanah dan mengurangi ketersediaan logam berat.
5	Inokulum AMF (*Arbuscular Mycorrhizal Fungi*)	Mikroba simbiotik akar untuk meningkatkan serapan hara dan ketahanan tanaman.
6	Inokulum PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*)	Bakteri rizosfer yang berperan dalam fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, dan remediasi logam berat.
7	Air bersih	Penyiraman tanaman dan pelarut untuk inokulum mikroba.

3.3 Prosedur Analisis Data

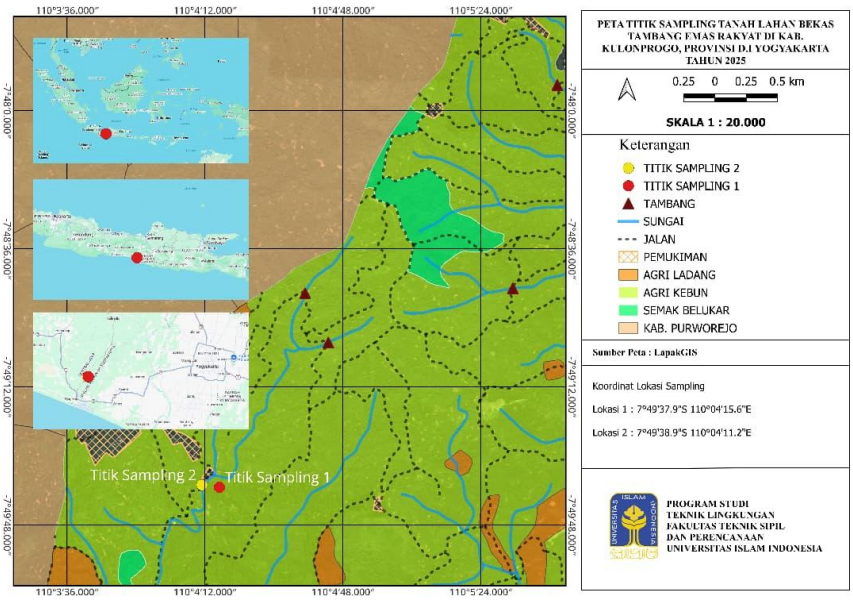
Tahapan prosedur penelitian secara sistematis dapat digambarkan melalui diagram alir seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**



Gambar 3. 1 Tahapan penelitian

3.3.1 Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah diambil dari lahan bekas tambang emas rakyat di Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pengambilan dilakukan menggunakan cangkul, lalu disimpan dalam karung/plastik untuk digunakan sebagai media percobaan, Pengambilan sampel dilakukan pada dua lokasi, yakni tanah *tailing* dari bekas tambang emas yang sudah tidak beroperasi, serta tanah dari area sekitar yang tidak terkena dampak langsung aktivitas pertambangan sebagai sampel pembanding.



Gambar 3. 2 Lokasi penelitian

Perbedaan kondisi lingkungan sekitar menjadi pembeda utama antara lokasi pengambilan sampel. Titik pertama berada di area yang berdekatan dengan peternakan kambing dan kebun milik warga, sedangkan titik kedua didominasi oleh vegetasi semak serta terletak kurang lebih 15 meter dari aliran sungai. Selain sampel tanah bekas tambang emas, penelitian ini juga mengambil sampel tanah non-tambang dari area sekitar yang tidak terpengaruh langsung oleh aktivitas pertambangan.

3.3.2 Persiapan Semai

Benih cabai rawit (*Capsicum frutescens L.*) dipilih yang berkualitas baik dan memiliki tinggi yang sama, untuk bibit yang digunakan berupa semai cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) berumur 2 bulan dengan tinggi berkisar antara 15–20 cm. Pemeliharaan tanaman dilakukan di rumah kaca yang terletak di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman.

3.3.3 Persiapan Media Tanam

Langkah awal dalam menyiapkan media tanam dilakukan dengan mensterilkan tanah yang telah dikumpulkan. Proses sterilisasi ini bertujuan untuk menghilangkan keberadaan

mikroorganisme patogen maupun biji gulma yang mungkin masih ada di dalam tanah. Sterilisasi dilakukan menggunakan autoklaf, yaitu alat bertekanan uap tinggi, selama kurang lebih lima jam pada suhu tinggi agar tanah benar-benar terbebas dari kontaminasi biotik. Setelah tanah steril, selanjutnya tanah dicampurkan dengan bahan organik berupa pupuk kompos. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *polybag* sebagai wadah tanam, sehingga media siap digunakan untuk kegitan percobaan maupun budidaya.

3.3.4 Persiapan Kompos dan Sekam

Kompos yang digunakan berasal dari limbah organik matang, sedangkan sekam padi bisa digunakan dalam bentuk sekam bakar. Keduanya ditimbang sesuai dosis perlakuan dan dicampurkan ke dalam media tanam. Kompos berfungsi meningkatkan kesuburan tanah, sementara sekam memperbaiki struktur tanah dan membantu remediasi logam berat.

3.3.5 Penanaman Semai

Penanaman dilakukan pada pagi hari guna memanfaatkan suhu yang masih sejuk serta kelembapan tanah yang lebih ideal, Penanaman dilakukan dengan hati-hati agar akar tidak rusak. Tanaman yang digunakan adalah cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.), yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi serta nilai ekonomi yang cukup potensial.

3.3.6 Inokulasi AMF

Inokulasi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) diberikan ke media tanam dengan dosis tertentu, diletakkan di sekitar perakaran bibit cabai. Inokulasi ini bertujuan meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap hara serta membantu mengurangi efek toksik logam berat.

3.3.7 Inokulasi PGPR

Inokulasi dilakukan dengan cara membuat dua lubang kecil pada media tanam di sekitar perakaran tanaman, dengan posisi saling berhadapan agar larutan dapat tersebar merata. Selanjutnya, masing-masing lubang diberi larutan PGPR sebanyak 5 ml menggunakan spuit steril, sehingga total aplikasi pada setiap polybag adalah 10 ml. Metode ini diterapkan untuk memastikan mikroorganisme dapat langsung bersentuhan dengan akar dan mendukung pertumbuhan tanaman secara maksimal.

3.3.8 Penyiraman Dan Pemeliharaan

Perawatan tanaman dilakukan secara teratur untuk memastikan pertumbuhan yang optimal. Penyiraman dilaksanakan setiap sore sekitar pukul 16.00 WIB, dengan tujuan menjaga kelembapan media tanam pada kondisi yang sesuai bagi kebutuhan tanaman. Pemupukan diberikan satu kali dalam seminggu sebagai upaya memenuhi kebutuhan nutrisi tambahan yang diperlukan untuk mendukung perkembangan vegetatif maupun generatif tanaman. Selain itu,

gulma atau tanaman liar yang muncul di dalam *polybag* secara berkala dicabut agar tidak mengganggu ketersediaan unsur hara, ruang tumbuh, maupun cahaya bagi tanaman utama dengan penerapan langkah-langkah perawatan ini, diharapkan tanaman cabai rawit dapat tumbuh sehat dan produktif

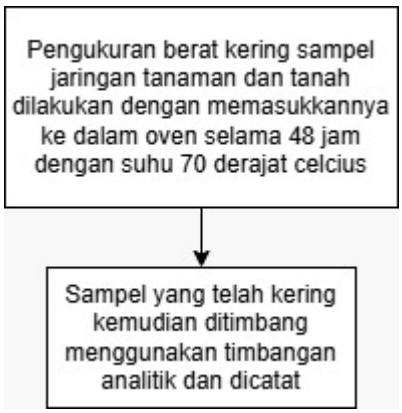
3.3.9 Pengambilan Data Pertumbuhan

Pengamatan pertumbuhan dilakukan secara berkala, meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, dan warna daun. Data pertumbuhan dicatat setiap minggu hingga tanaman memasuki fase generatif.

3.3.10 Panen Dan Pengambilan Sampel

Proses pemanenan dilakukan setelah tanaman berumur 1,5 bulan (6 minggu). Pengamatan dibatasi hanya sampai periode tersebut karena mulai terlihat peningkatan angka kematian pada sebagian tanaman. Jika pengamatan dilanjutkan ke minggu-minggu berikutnya, dikhawatirkan mayoritas tanaman akan mati sehingga data pertumbuhan yang diperoleh tidak lagi representatif. Dengan pertimbangan tersebut, kegiatan pengamatan dihentikan pada minggu ke-6 untuk memastikan data yang diperoleh tetap valid dan menggambarkan kondisi tanaman sebelum terjadi kematian lebih lanjut.

Pada tahap pemanenan, tanaman dipisahkan menjadi bagian tanah, batang, dan akar. Biomassa basah (**Gambar 3.4**) diukur terlebih dahulu menggunakan timbangan analitik. Sampel batang dan akar kemudian dimasukkan ke dalam amplop coklat yang telah diberi kode identitas masing-masing. Sementara itu, tanah dari setiap tanaman dikumpulkan dalam plastik kiloan yang tertutup rapat untuk mencegah masuknya udara, serta diberi kode identitas sesuai nomor sampel. Pengukuran biomassa kering (**Gambar 3.3**) dilakukan setelah sampel tanaman dikeringkan dalam oven pada suhu 70 °C selama 72 jam, kemudian ditimbang kembali menggunakan timbangan analitik dengan ketelitian 0,001 gram



Gambar 3. 3 Biomassa (berat kering)



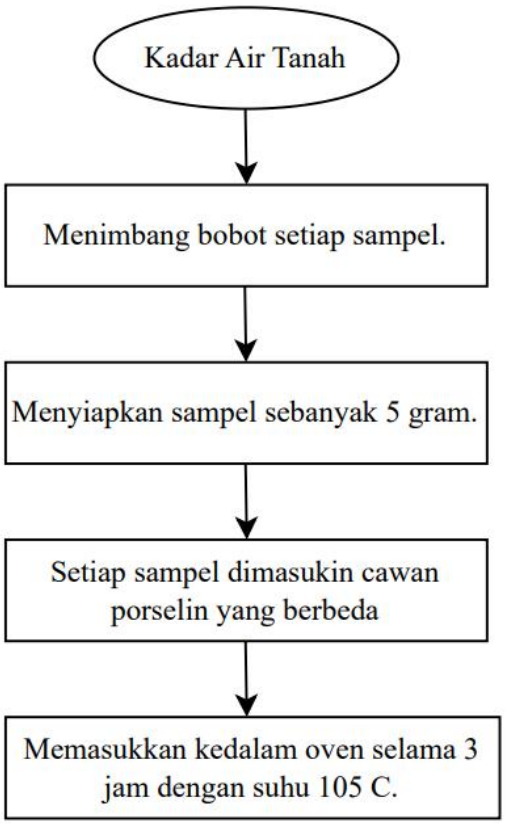
Gambar 3. 4 Biomassa (berat basah)

3.4 Anallisis Labotarium

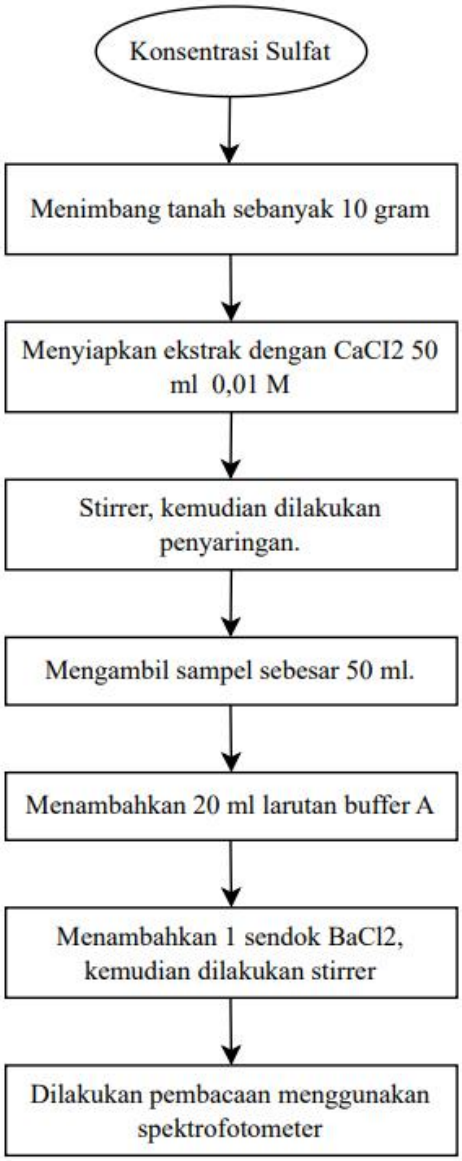
Dalam penelitian ini, analisis data dilakukan menggunakan pendekatan statistik untuk membandingkan hasil dari setiap perlakuan yang diterapkan. Parameter yang dianalisis meliputi pH tanah, kandungan unsur hara, serta kadar logam berat. Sampel yang digunakan terdiri atas tanah dan jaringan tanaman, mencakup akar, batang, dan daun. Pengukuran pH dilakukan di Laboratorium Penguji Balai Penerapan Standar Instrumen Pertanian Yogyakarta. Analisis unsur hara difokuskan pada kandungan fosfat, yang diuji menggunakan perangkat AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*). Sementara itu, pengujian logam berat terpusat pada merkuri (Hg), dengan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry*).

Tahapan penelitian ini dilakukan melalui beberapa proses analisis laboratorium yang bertujuan untuk mengetahui kondisi kualitas tanah serta kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara dan logam berat pada lahan bekas tambang emas. Alur tahapan penelitian tersebut disajikan dalam bentuk *flowchart* untuk mempermudah pemahaman mengenai urutan proses analisis yang dilakukan. Tahapan analisis dimulai dari pengujian kadar air tanah, kemudian dilanjutkan dengan analisis konsentrasi sulfat dalam tanah. Selanjutnya dilakukan analisis kandungan fosfor tanah serta kandungan fosfor pada jaringan tanaman. Tahapan berikutnya yaitu

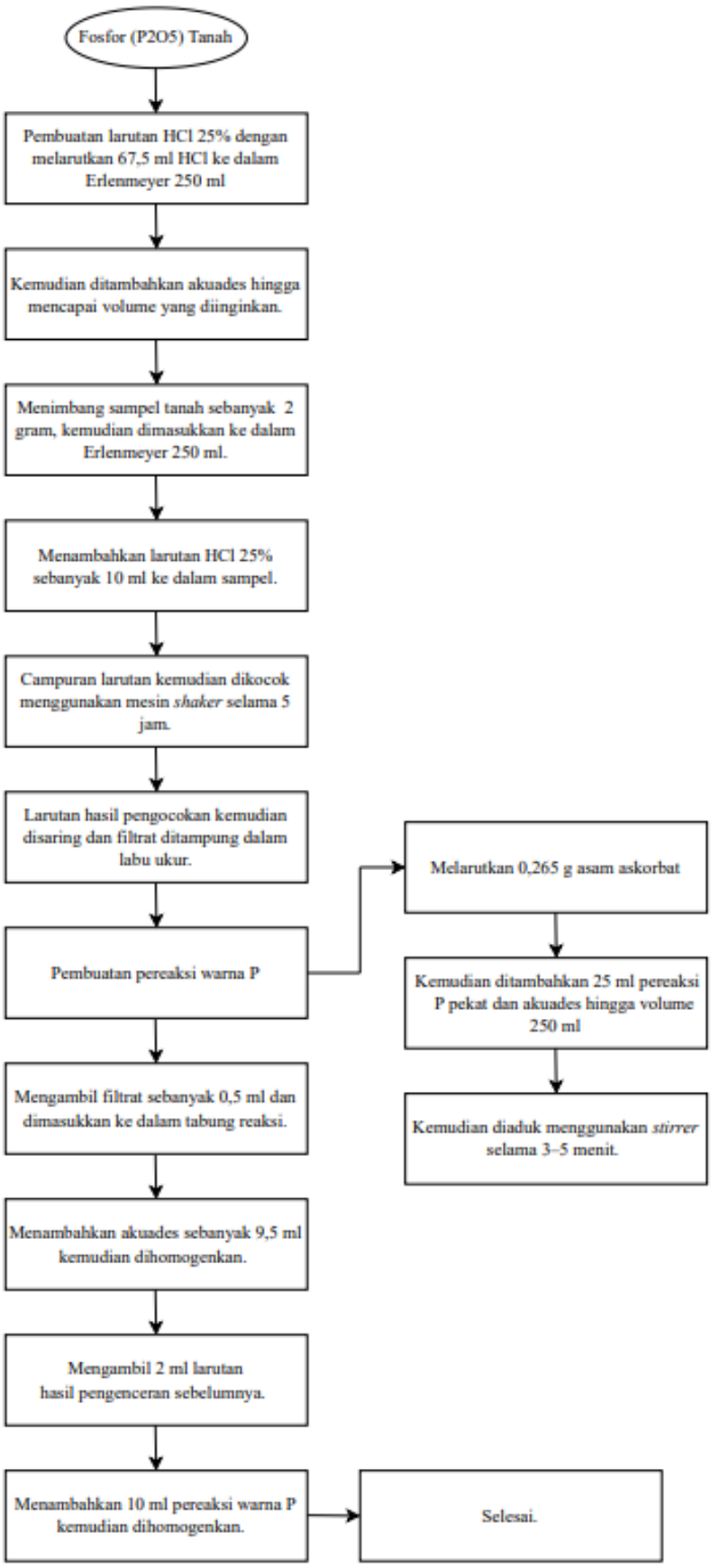
analisis kandungan merkuri (Hg) pada tanah, serta analisis merkuri pada bagian tanaman yang meliputi batang dan akar. Setelah seluruh pengujian laboratorium dilakukan, tahap terakhir adalah perhitungan dan analisis data hasil laboratorium untuk mengetahui pengaruh perlakuan yang diberikan terhadap kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman. Secara keseluruhan, alur tahapan analisis laboratorium dalam penelitian ini dapat dilihat pada flowchart penelitian yang disajikan pada **Gambar 3.5.**



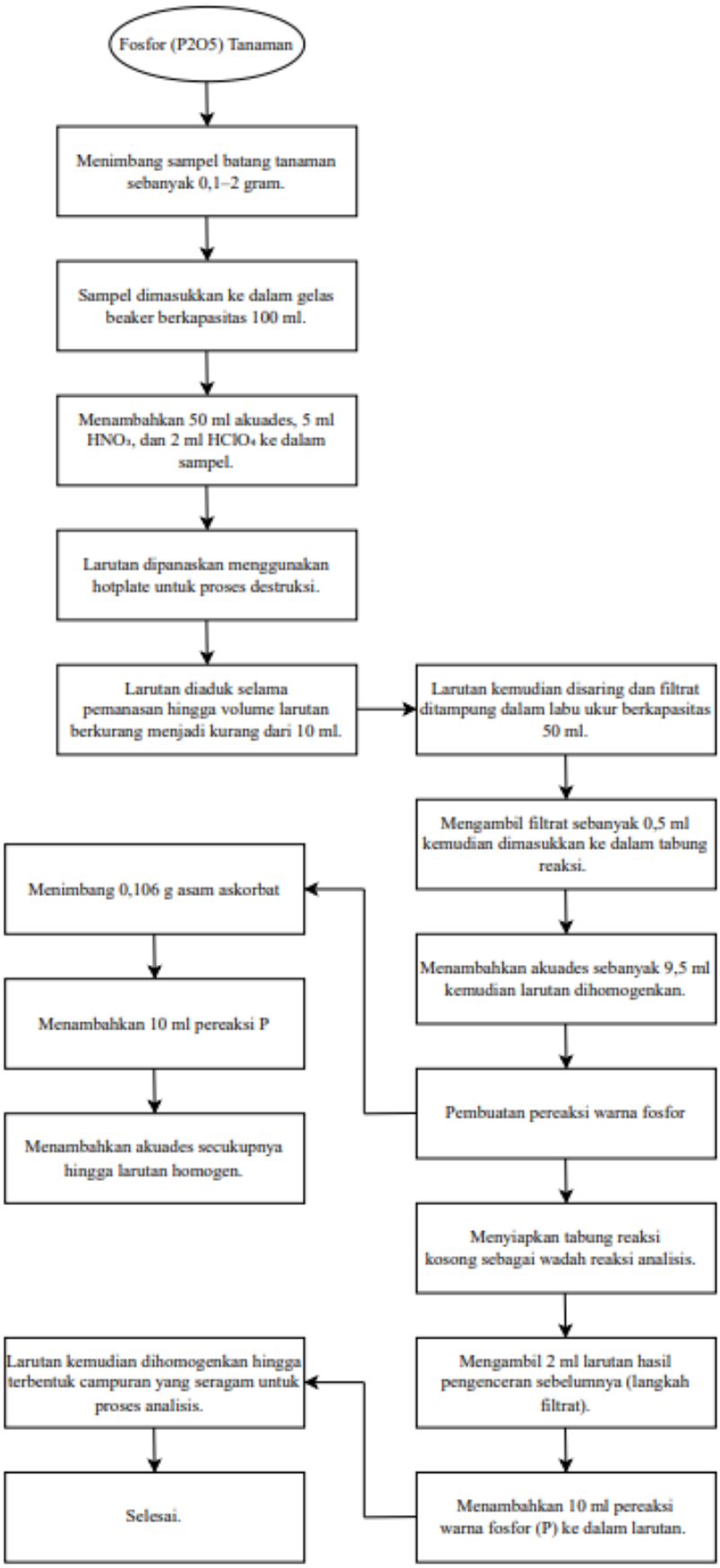
Gambar 3. 5 Pengujian kadar air tanah



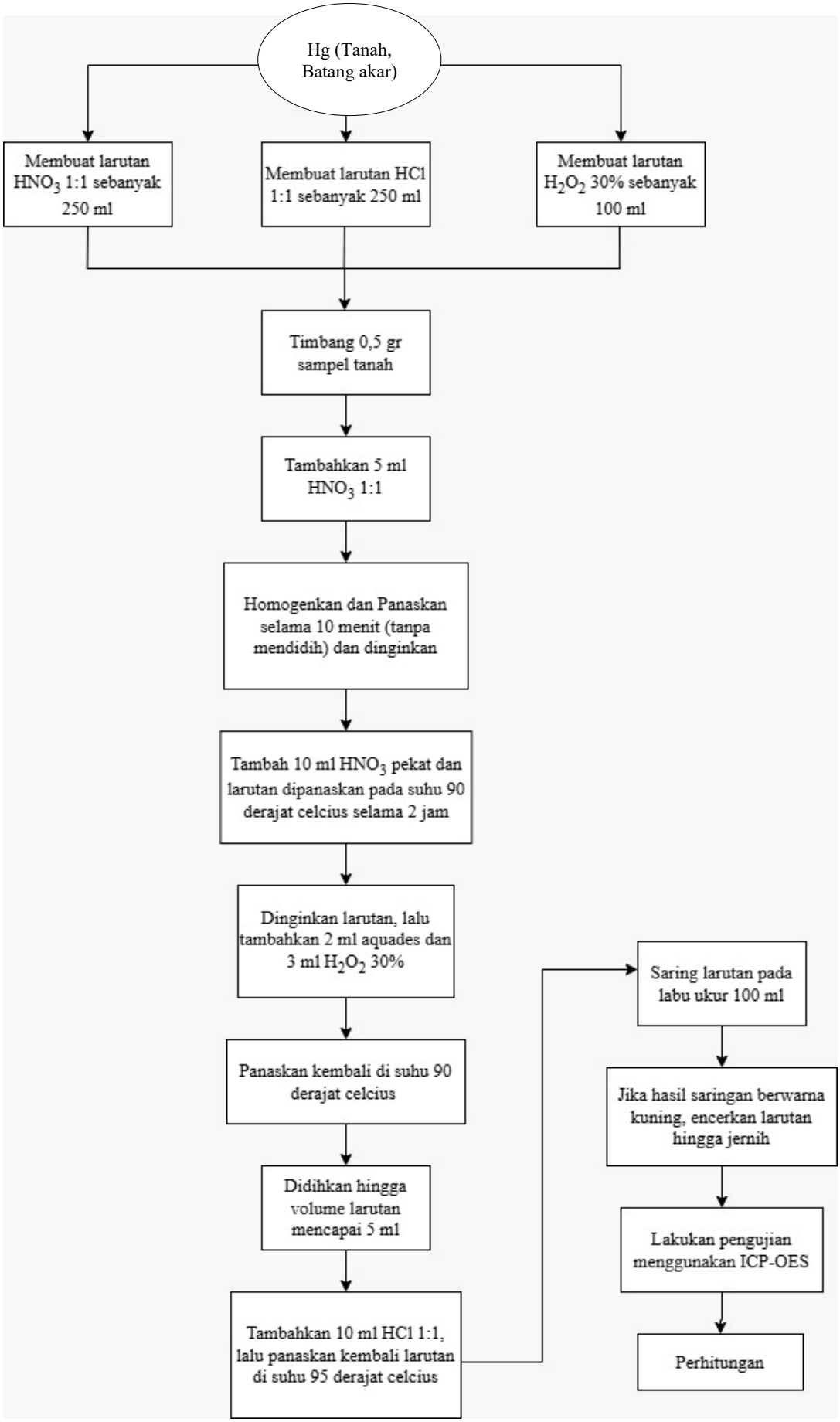
Gambar 3. 6 Pengujian konsentrasi sulfat



Gambar 3. 7 Pengujian fosfor (P_2O_5) tanah



Gambar 3. 8 Pengujian fosfor (P_2O_5) tanaman



Gambar 3. 9 Pengujian Hg (tanah,batang,akar)

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Kombinasi Kompos, Sekam, AMF, Dan PGPR Terhadap Kualitas Tanah Dan Pertumbuhan Tanaman *Capsicum frutescens* L.

Pengamatan pertumbuhan tanaman *Capsicum frutescens* L. dilakukan secara berkala setiap dua minggu selama periode enam minggu atau sekitar 1,5 bulan. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun, serta biomassa tanaman setelah pemberian perlakuan. Pengamatan ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh bahan pembenah tanah, yaitu kompos, Sekam, *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), dan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR), yang digunakan sebagai media tanam.



Gambar 4.1 Semai cabai rawit

4.1.1 *Survival Rate* Tanaman *Capsicum frutescens* L.

Berdasarkan hasil pengamatan *survival rate* tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.), perlakuan K2 + M + P (kompos + sekam + mikoriza + PGPR) menunjukkan tingkat kelangsungan hidup tanaman yang lebih baik dibandingkan perlakuan kontrol. Pada minggu ke-0, seluruh tanaman pada kedua perlakuan berada dalam kondisi hidup dengan *survival rate* sebesar 100%. Pada minggu ke-2, perlakuan kontrol mengalami penurunan jumlah tanaman hidup menjadi 3 tanaman dari total 11 tanaman, dengan *survival rate* sebesar 27%. Sebaliknya, pada perlakuan K2 + M + P seluruh tanaman masih bertahan hidup, sehingga *survival rate* tetap mencapai 100%. Penurunan *survival rate* pada perlakuan kontrol semakin terlihat pada minggu ke-4 dan minggu ke-6, di mana jumlah tanaman hidup hanya tersisa 2 tanaman dengan *survival rate* sebesar 18%. Sementara itu, perlakuan K2 + M + P mampu mempertahankan seluruh tanaman tetap hidup hingga akhir periode pengamatan, dengan *survival rate* yang konsisten sebesar 100%.

Hasil pada **Tabel 4.1** ini menunjukkan bahwa aplikasi kombinasi kompos, sekam, mikoriza, dan PGPR berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman cabai terhadap kondisi lahan bekas tambang emas. Bahan pembenah tanah tersebut diduga mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, meningkatkan ketersediaan unsur hara, serta mendukung perkembangan sistem perakaran, sehingga tanaman mampu bertahan hidup lebih optimal dibandingkan dengan perlakuan tanpa pembenah tanah

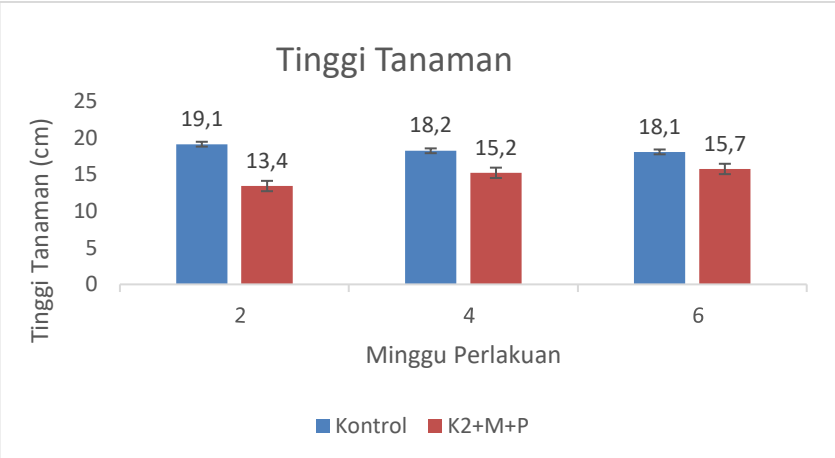
Tabel 4.1 *Survival rate*

Minggu	Kontrol		K2 + M + P (Kompos + Sekam + Mikoriza + PGPR)		Persentase	
	Hidup	Mati	Hidup	Mati	Kontrol	K1 + P
0	11	0	11	0	100%	100%
2	3	8	11	0	27%	100%
4	2	1	11	0	18%	100%
6	2	0	11	0	18%	100%

4.1.2 Tinggi Tanaman

Berdasarkan hasil pengamatan tinggi tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.) pada minggu ke-2, ke-4, dan ke-6, diketahui bahwa perlakuan K2 + M + P menunjukkan pertumbuhan tinggi tanaman yang meningkat seiring waktu. Tinggi tanaman pada perlakuan K2 + M + P berturut-turut sebesar 13,4 cm, 15,2 cm, dan 15,7 cm. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian kompos, mikoriza, dan PGPR mampu mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman secara bertahap.

Pada **Gambar 4.1** menampilkan perlakuan kontrol, tinggi tanaman relatif lebih tinggi pada awal pengamatan, yaitu 19,1 cm pada minggu ke-2, namun cenderung stagnan hingga minggu ke-6 dengan tinggi tanaman sebesar 18,1 cm. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanaman pada perlakuan kontrol kurang mendapatkan dukungan nutrisi yang berkelanjutan pada media tanam lahan bekas tambang emas.



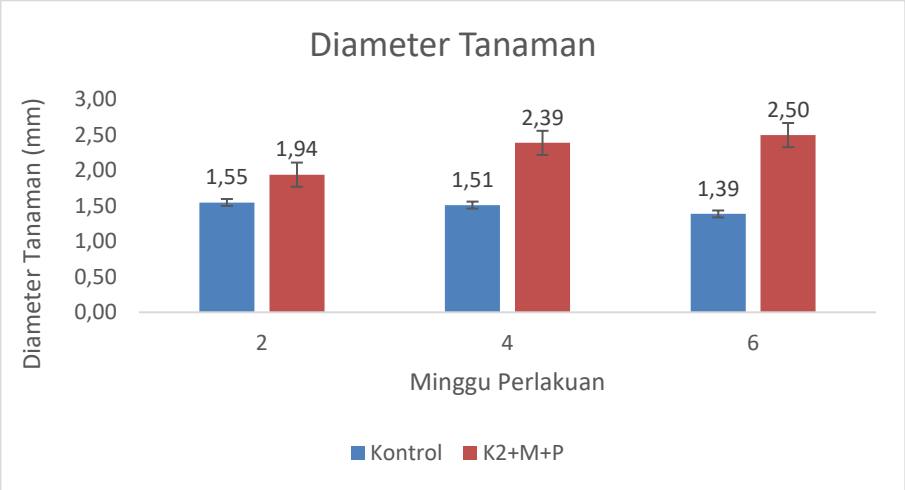
Gambar 4.2 Tingggi tanaman

Perbedaan pola pertumbuhan tersebut menunjukkan bahwa aplikasi kompos yang dikombinasikan dengan mikoriza dan PGPR berperan dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara dan penyerapan nutrien oleh tanaman, sehingga pertumbuhan tinggi tanaman dapat berlangsung lebih stabil pada kondisi tanah yang terdegradasi, yang menyatakan bahwa mikoriza berperan dalam meningkatkan penyerapan unsur hara, khususnya fosfor, sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman.

4.1.3 Diameter Tanaman

Berdasarkan hasil pengamatan, diameter batang tanaman cabai (*Capsicum frutescens* L.) pada perlakuan K2 + M + P menunjukkan peningkatan selama periode pengamatan. Pada minggu ke-2, ke-4, dan ke-6, diameter tanaman berturut-turut sebesar 1,94 mm, 2,39 mm, dan 2,50 mm. Peningkatan diameter batang ini menunjukkan bahwa pemberian kompos yang dikombinasikan dengan mikoriza dan PGPR mampu mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman secara optimal.

Pada **Gambar 4.2** perlakuan kontrol, diameter tanaman relatif lebih kecil dan cenderung menurun seiring waktu, yaitu sebesar 1,55 mm pada minggu ke-2, 1,51 mm pada minggu ke-4, dan 1,39 mm pada minggu ke-6. Hal ini mengindikasikan bahwa tanaman pada perlakuan kontrol mengalami keterbatasan ketersediaan unsur hara untuk menunjang pertumbuhan batang.



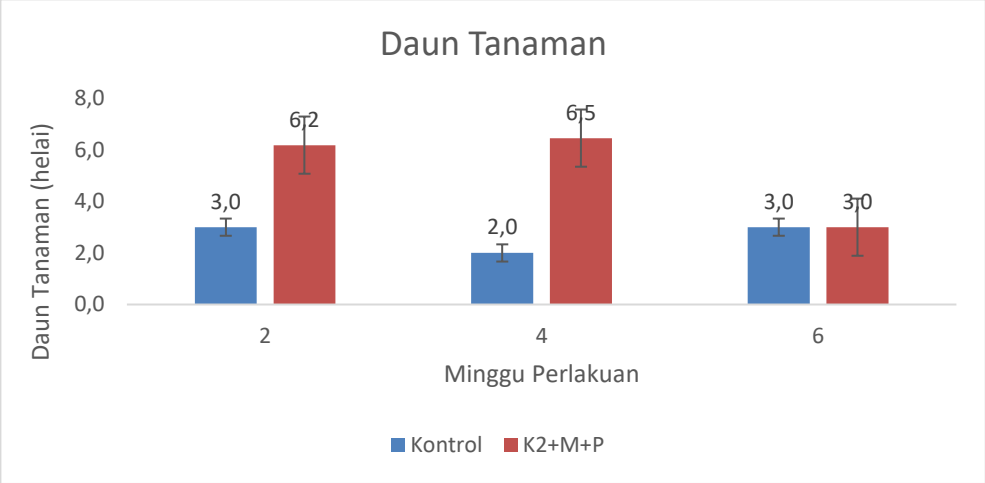
Gambar 4.3 Diameter tanaman

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa mikoriza dan PGPR berperan dalam meningkatkan penyerapan unsur hara serta memperbaiki pertumbuhan jaringan tanaman, sehingga berpengaruh positif terhadap peningkatan diameter batang, terutama pada tanah marginal dan terdegradasi (Smith & Read, 2008; Vessey, 2003).

4.1.4 Daun Tanaman

Berdasarkan hasil pengamatan **(Gambar 4.3)** jumlah daun tanaman selama periode perlakuan, terlihat adanya perbedaan respons pertumbuhan antara tanaman kontrol dan tanaman dengan perlakuan K2+M+P. Pada minggu ke-2, jumlah daun tanaman kontrol tercatat rata-rata

sebesar 3,0 helai, sedangkan tanaman dengan perlakuan K2+M+P menunjukkan jumlah daun yang lebih tinggi, yaitu sebesar 6,2 helai. Pada minggu ke-4, jumlah daun tanaman kontrol mengalami penurunan menjadi 2,0 helai, sementara tanaman perlakuan K2+M+P tetap menunjukkan peningkatan dengan rata-rata 6,5 helai daun. Selanjutnya, pada minggu ke-6, jumlah daun tanaman kontrol kembali meningkat menjadi 3,0 helai, sedangkan tanaman perlakuan K2+M+P mengalami penurunan menjadi 3,0 helai daun.



Gambar 4.4 Daun tanaman

Secara umum, perlakuan K2+M+P memberikan pengaruh positif terhadap pembentukan jumlah daun pada fase awal hingga pertengahan pertumbuhan tanaman, yang mengindikasikan adanya peran perlakuan dalam meningkatkan aktivitas fisiologis dan proses pembelahan sel daun, sebagaimana dilaporkan bahwa ketersediaan unsur hara dan perlakuan pendukung pertumbuhan dapat meningkatkan pembentukan daun dan luas tajuk tanaman pada fase vegetatif**.**

4.1.5 Biomassa Tanaman

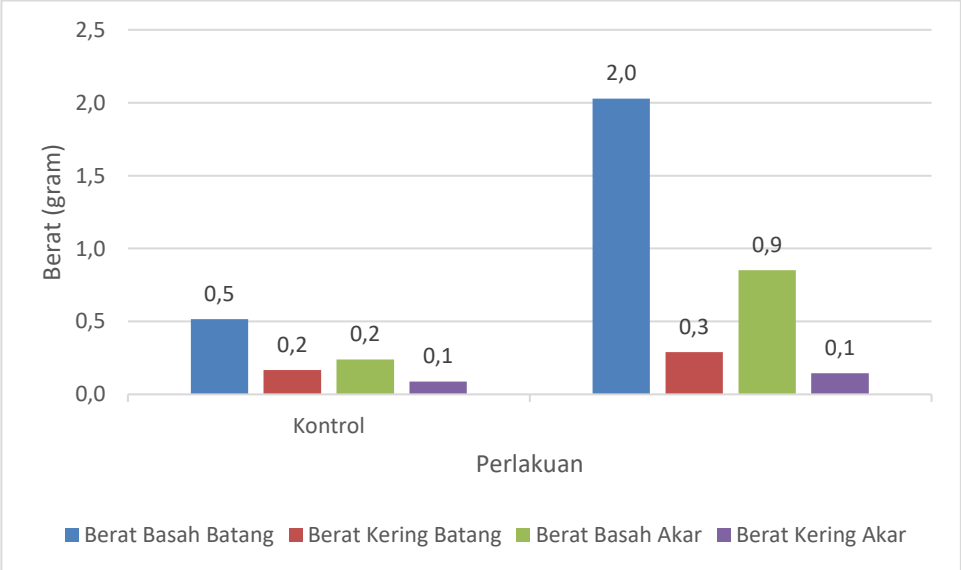
Biomassa tanaman *Capsicum frutescens L.* merupakan parameter penting untuk mengevaluasi pertumbuhan tanaman sebagai respon terhadap perlakuan yang diberikan. Biomassa yang diamati dalam penelitian ini meliputi berat basah batang, berat kering batang, berat basah akar, dan berat kering akar pada perlakuan kontrol dan perlakuan K2 + M + P. Pengukuran biomassa dilakukan dengan metode penimbangan langsung menggunakan neraca analitik, dimana berat basah diukur segera setelah panen, sedangkan berat kering diperoleh setelah proses pengeringan hingga mencapai berat konstan.

Berdasarkan **Gambar 4.4**, biomassa tanaman pada perlakuan kontrol menunjukkan nilai berat basah batang sebesar 0,5 gram, sedangkan pada perlakuan K2 + M + P meningkat menjadi 2,0 gram. Peningkatan ini menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman, khususnya pada bagian batang. Berat kering batang pada perlakuan kontrol tercatat sebesar 0,2 gram dan meningkat menjadi 0,3 gram pada perlakuan K2

+ M + P, yang menunjukkan adanya peningkatan akumulasi bahan organik hasil proses metabolisme tanaman.

Pada bagian akar, berat basah akar pada perlakuan kontrol sebesar 0,2 gram, sedangkan pada perlakuan K2 + M + P meningkat menjadi 0,9 gram. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P mampu meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan sistem perakaran tanaman. Sistem perakaran yang berkembang dengan baik akan meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara dari media tanam, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan. Sementara itu, berat kering akar pada perlakuan kontrol dan perlakuan K2 + M + P menunjukkan nilai yang sama yaitu sebesar 0,1 gram, yang menunjukkan bahwa peningkatan biomassa akar lebih terlihat pada kandungan air jaringan akar.

Secara keseluruhan, perlakuan K2 + M + P menunjukkan peningkatan biomassa tanaman yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan kontrol, terutama pada berat basah batang dan berat basah akar. Peningkatan biomassa ini menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman melalui peningkatan akumulasi hasil fotosintesis dan penyerapan unsur hara. Biomassa tanaman merupakan indikator penting dalam menilai pertumbuhan tanaman, karena mencerminkan efisiensi proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis dan penyerapan nutrisi (Taiz dkk., 2015; Poorter dkk., 2016; Hasanuzzaman dkk., 2020). Selain itu, peningkatan biomassa akar berperan dalam meningkatkan kapasitas penyerapan unsur hara dan mendukung pertumbuhan bagian atas tanaman secara optimal (Lynch, 2019; Smith and Smith, 2015).



Gambar 4.5 Biomassa tanaman

Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan biomassa tanaman *Capsicum frutescens L.*, yang ditunjukkan oleh peningkatan berat basah batang, berat kering batang, dan berat basah akar

dibandingkan dengan perlakuan kontrol.

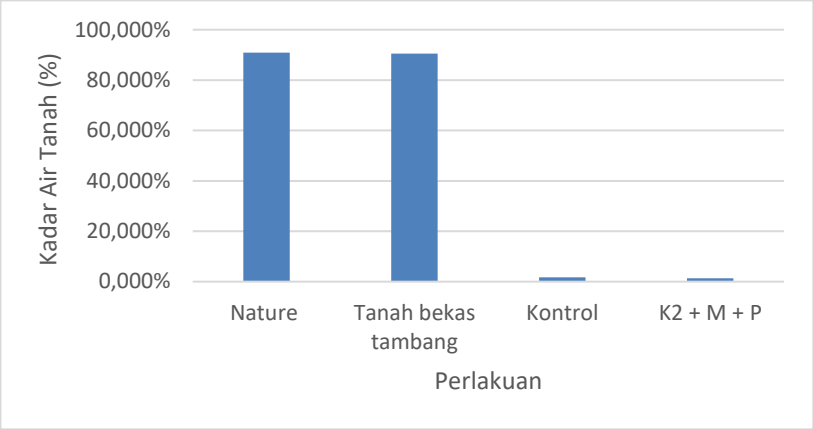
4.2 Pengaruh Kompos, Sekam, AMF, dan PGPR sebagai Media Mikroba terhadap Nutrisi

Kesuburan tanah sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara di dalamnya. Unsur hara berperan sebagai sumber nutrisi penting yang harus tersedia dalam jumlah yang sesuai agar tidak menimbulkan efek toksik maupun dampak negatif terhadap ekosistem dan organisme di sekitarnya. Selain itu, unsur hara juga merupakan sumber nutrisi utama bagi tanaman yang dapat berasal secara alami dari tanah maupun melalui penambahan dari luar, seperti pupuk. Tanah mengandung berbagai jenis unsur hara, di antaranya kadar air tanah, sulfat, P_2O_5 tanah, dan P_2O_5 pada batang tanaman, yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

4.2.1 Kadar Air Tanah

Berdasarkan **Gambar 4.6**, ditunjukkan hasil pengukuran kadar air tanah pada beberapa perlakuan, yaitu tanah *nature*, tanah bekas tambang, tanah kontrol, dan tanah dengan perlakuan K2 + M + P. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar air tanah tertinggi terdapat pada tanah *nature* dengan nilai sekitar 9,00%. Sementara itu, kadar air tanah pada tanah bekas tambang menunjukkan nilai yang relatif mendekati, yaitu sekitar 8,90%, namun sedikit lebih rendah dibandingkan tanah *nature*. Pada tanah kontrol, kadar air tanah tercatat sekitar 1,00%, sedangkan pada perlakuan K2 + M + P sebesar ±1,20%, yang menunjukkan nilai yang relatif rendah dan tidak berbeda jauh dengan perlakuan kontrol, meskipun sedikit lebih tinggi.

Perbedaan kadar air tanah pada masing-masing perlakuan diduga dipengaruhi oleh kondisi fisik tanah dan kandungan bahan organik. Tanah dengan kandungan bahan organik yang lebih tinggi cenderung memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan air, sehingga kadar air tanah menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, tanah dengan kandungan bahan organik yang rendah memiliki kapasitas menahan air yang lebih kecil, sehingga kadar air tanah menjadi lebih rendah. Selain itu, struktur dan kedalaman solum tanah juga berperan dalam menentukan kadar air tanah, dimana semakin baik struktur dan semakin dalam solum tanah, maka kemampuan tanah dalam menyimpan air juga semakin besar.



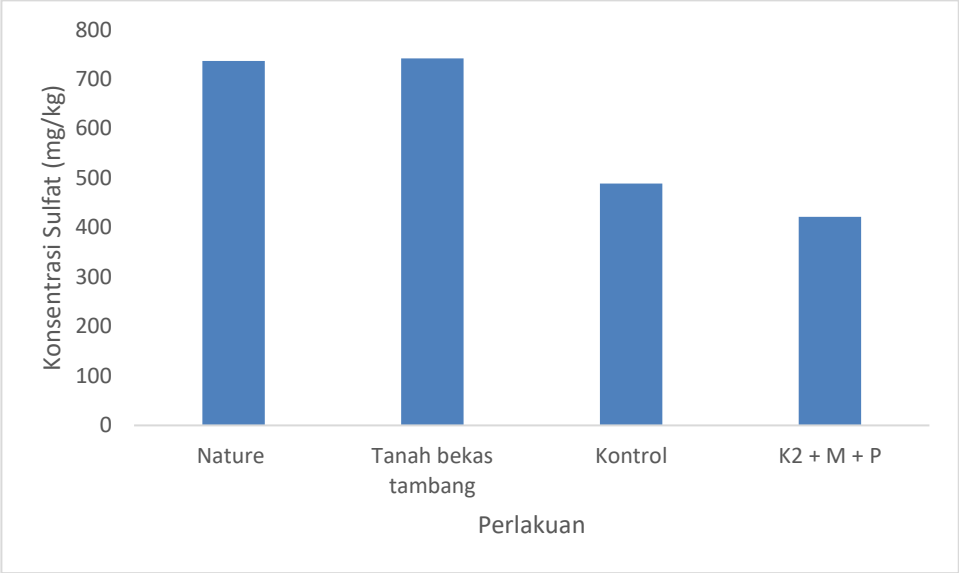
Gambar 4.6 Kadar air tanah

Fenomena ini menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P memiliki kadar air tanah yang relatif sama dengan kontrol dan masih jauh lebih rendah dibandingkan tanah *nature* maupun tanah bekas tambang, yang mengindikasikan bahwa perlakuan tersebut belum memberikan perubahan yang signifikan terhadap kemampuan tanah dalam menyimpan air. Namun demikian, kadar air tanah tetap menjadi parameter penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman, karena ketersediaan air berperan dalam proses fisiologis tanaman, termasuk penyerapan unsur hara dan aktivitas metabolisme. Hal ini sejalan dengan pendapat Hanafiah (2014) yang menyatakan bahwa kadar air tanah dipengaruhi oleh kandungan bahan organik dan sifat fisik tanah, dimana peningkatan bahan organik akan meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air.

4.2.2 Konsentrasi Sulfat

Sulfat merupakan anion poliatomik dengan rumus kimia SO_4^{2-} dan memiliki massa molar sekitar 96,06 g/mol. Secara struktur, atom sulfur berada di pusat dan berikatan dengan empat atom oksigen membentuk konfigurasi tetrahedral. Ion sulfat bermuatan negatif dua dan merupakan basa konjugat dari ion hidrogen sulfat (bisulfat) (Ramadhani, 2023). Analisis kandungan sulfat dalam penelitian ini dilakukan mengacu pada SNI 06-6989.20-2024 menggunakan metode turbidimetri untuk pengujian SO_4^{2-}.

Berdasarkan **Gambar 4.7**, ditampilkan hasil pengukuran konsentrasi sulfat pada beberapa perlakuan, yaitu tanah *nature*, tanah bekas tambang, tanah kontrol, dan perlakuan K2 + M + P. Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi sulfat tertinggi terdapat pada tanah bekas tambang dengan nilai sekitar 740 mg/kg, diikuti oleh tanah *nature* sebesar ±730 mg/kg. Sementara itu, konsentrasi sulfat pada tanah kontrol tercatat sekitar 490 mg/kg, dan pada perlakuan K2 + M + P sebesar ±420 mg/kg, yang merupakan nilai terendah di antara seluruh perlakuan.



Gambar 4.7 Konsentrasi sulfat

Tingginya kadar sulfat pada tanah bekas tambang diduga berkaitan dengan kondisi lingkungan sekitar lokasi sampling. Salah satu faktor yang memengaruhi adalah kedekatan area pengambilan sampel dengan aktivitas peternakan kambing. Ekskresi kambing, baik berupa kotoran maupun urin, diketahui mengandung senyawa sulfat yang berasal dari proses dekomposisi protein (Shand et al., 2002). Hal ini menyebabkan akumulasi sulfat dalam tanah menjadi lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya.

Sebaliknya, rendahnya konsentrasi sulfat pada perlakuan K2 + M + P menunjukkan adanya kemungkinan pemanfaatan atau transformasi sulfat oleh aktivitas mikroorganisme maupun tanaman, sehingga kadar sulfat yang terukur menjadi lebih rendah dibandingkan tanah kontrol dan tanah lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa perlakuan K2 + M + P berpotensi memengaruhi dinamika unsur sulfur dalam tanah.

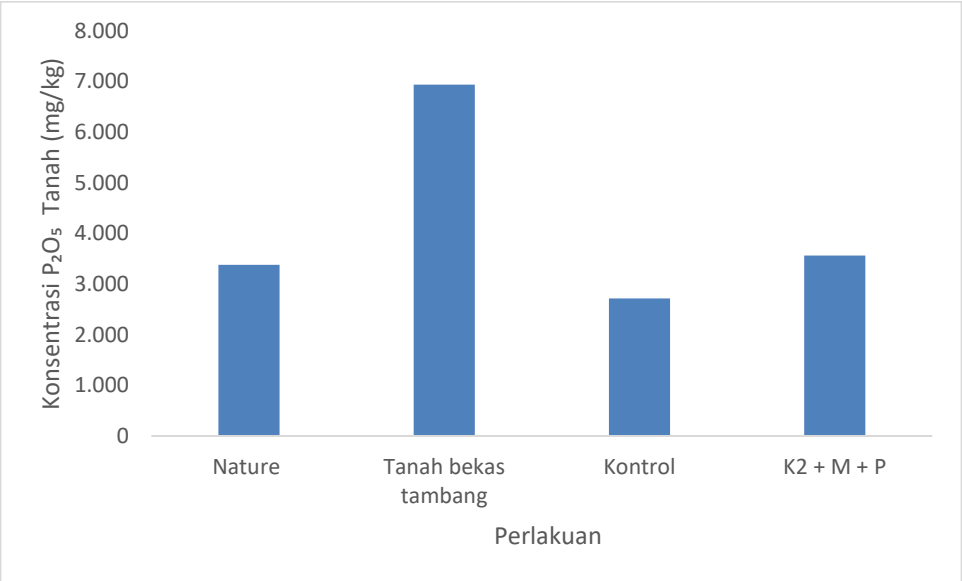
4.2.3 Konsentrasi P_2O_5 Tanah

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara esensial yang berperan dalam pembentukan berbagai senyawa penting di dalam tanaman serta berfungsi dalam proses transfer energi. Unsur ini terlibat dalam mekanisme fotosintesis, respirasi, dan sintesis asam nukleat, sehingga sangat menentukan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Selain itu, fosfor juga mendukung proses pembelahan sel dan pembentukan sistem perakaran yang optimal (Rohmah, 2015).

Berdasarkan **Gambar 4.8**, ditampilkan hasil analisis konsentrasi P_2O_5 pada tanah *nature*, tanah bekas tambang, tanah kontrol, dan perlakuan K2 + M + P. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi P_2O_5 tertinggi terdapat pada tanah bekas tambang dengan nilai sekitar 6,900 mg/kg. Sementara itu, konsentrasi P_2O_5 terendah ditemukan pada tanah kontrol sebesar ±2,700 mg/kg. Tanah *nature* memiliki kadar P_2O_5 sekitar 3,300 mg/kg, sedangkan perlakuan K2 + M + P

menunjukkan nilai sekitar 3,500 mg/kg.

Tingginya kadar P_2O_5 pada tanah bekas tambang dapat disebabkan oleh akumulasi residu mineral tertentu yang masih mengandung fosfat. Namun demikian, tingginya kandungan total P_2O_5 belum tentu mencerminkan ketersediaan fosfor yang dapat langsung diserap tanaman, karena faktor pH tanah serta keberadaan ion Fe^{3+} dan Al^{3+} dapat mengikat fosfat dalam bentuk yang tidak tersedia.



Gambar 4.8 Konsentrasi P_2O_5 tanah

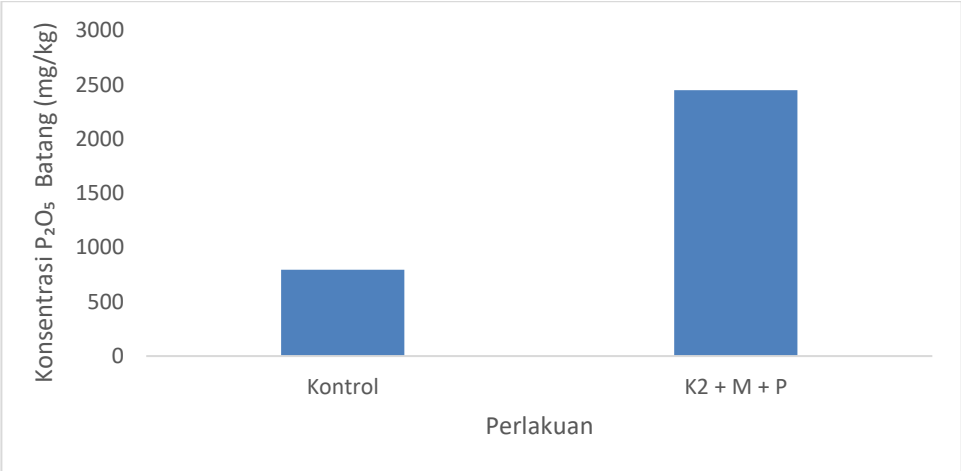
Tanah nature menunjukkan kadar fosfat yang relatif stabil, yang mencerminkan kondisi tanah yang masih alami dengan dukungan bahan organik dan aktivitas mikroorganisme tanah. Pada tanah kontrol, kadar P_2O_5 yang lebih rendah mengindikasikan keterbatasan unsur fosfor yang tersedia. Sementara itu, perlakuan K2 + M + P menunjukkan adanya peningkatan kadar P_2O_5 dibandingkan kontrol, yang mengindikasikan bahwa penambahan kompos, mikoriza, dan PGPR berpotensi meningkatkan kandungan fosfor tanah. Hal ini sejalan dengan pendapat Jayadi et al. (2023) yang menyatakan bahwa aplikasi bahan pembenah tanah dan agen hayati dapat meningkatkan ketersediaan fosfat melalui proses mineralisasi dan pelarutan fosfat di dalam tanah.

4.2.4 Konsentrasi P_2O_5 Batang

Berdasarkan **Gambar 4.9** menunjukkan hasil analisis kandungan P_2O_5 pada batang tanaman yang berasal dari tanah kontrol dan perlakuan K2 + M + P (Kompos, Mikoriza, dan PGPR). Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa konsentrasi P_2O_5 tertinggi terdapat pada perlakuan K2 + M + P dengan nilai sekitar 2.450 mg/kg, sedangkan konsentrasi terendah terdapat pada perlakuan kontrol sebesar ±800 mg/kg.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P mampu meningkatkan serapan fosfor oleh tanaman secara signifikan dibandingkan kontrol. Tingginya kandungan P_2O_5 pada

batang tanaman perlakuan mengindikasikan bahwa fosfor yang tersedia di dalam tanah dapat diserap dan ditranslokasikan secara lebih optimal ke jaringan tanaman, khususnya bagian batang. Peran mikoriza dan PGPR dalam meningkatkan kelarutan serta penyerapan fosfat diduga menjadi faktor utama yang mendukung peningkatan tersebut. Ketersediaan dan serapan fosfat oleh tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama pH tanah. Selain itu, kondisi aerasi tanah, suhu, kandungan bahan organik, serta keberadaan unsur hara lain juga turut menentukan efektivitas penyerapan fosfor (Siswanto, 2019). Dengan demikian, peningkatan konsentrasi P_2O_5 pada batang tanaman perlakuan K2 + M + P menunjukkan bahwa kombinasi bahan pembenah dan agen hayati berperan dalam memperbaiki efisiensi pemanfaatan fosfor oleh tanaman.



Gambar 4.9 Konsentrasi P_2O_5 batang

4.3 Pengaruh Kompos, Sekam, AMF dan PGPR sebagai Media Mikroba terhadap Logam Berat

Logam berat merkuri (Hg) merupakan unsur toksik yang banyak ditemukan sebagai komponen utama dalam limbah pertambangan emas. Hal ini disebabkan oleh perannya sebagai bahan pengikat dalam proses amalgamasi untuk mengekstraksi emas (Yulis, 2020).

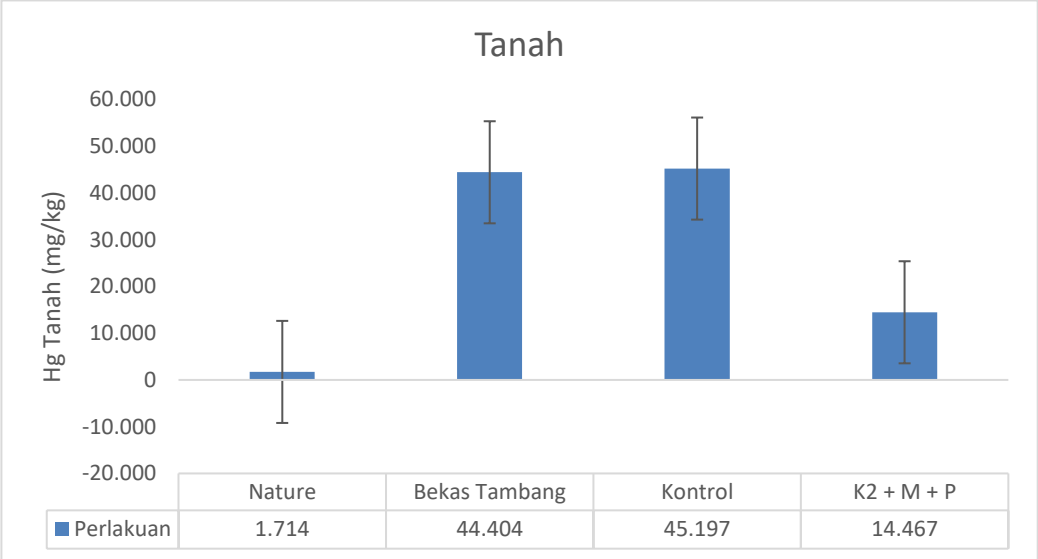
4.3.1 Konsentrasi Logam Hg Tanah

Pada **Gambar 4.10** menampilkan hasil analisis kandungan logam berat merkuri (Hg) pada beberapa jenis tanah, yaitu tanah *nature*, tanah bekas tambang, tanah kontrol, serta tanah dengan perlakuan K2 + M + P (Kompos, Mikoriza, dan PGPR). Berdasarkan grafik tersebut, konsentrasi Hg tertinggi teridentifikasi pada tanah kontrol sebesar 45,197 mg/kg, diikuti oleh tanah bekas tambang sebesar 44,404 mg/kg. Sementara itu, kadar Hg terendah terdapat pada tanah *nature* dengan nilai 1,714 mg/kg. Pada perlakuan K2 + M + P, konsentrasi Hg tercatat sebesar 14,467 mg/kg.

Data tersebut menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P mampu menurunkan kadar Hg secara signifikan dibandingkan tanah bekas tambang. Konsentrasi Hg pada tanah bekas tambang

sebesar 44,404 mg/kg mengalami penurunan menjadi 14,467 mg/kg setelah diberikan perlakuan. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan kompos, mikoriza, dan PGPR berpotensi membantu proses imobilisasi atau stabilisasi logam berat di dalam tanah, sehingga menurunkan kadar Hg terukur.

Namun demikian, apabila dibandingkan dengan batas maksimum kandungan Hg dalam tanah menurut Alloway (1990), yaitu sebesar 0,06 mg/kg, seluruh perlakuan masih menunjukkan nilai yang jauh melebihi ambang batas tersebut. Oleh karena itu, meskipun terjadi penurunan kadar Hg pada perlakuan K2 + M + P, diperlukan upaya remediasi lanjutan untuk menekan konsentrasi Hg hingga berada pada batas aman bagi lingkungan dan pertumbuhan tanaman.

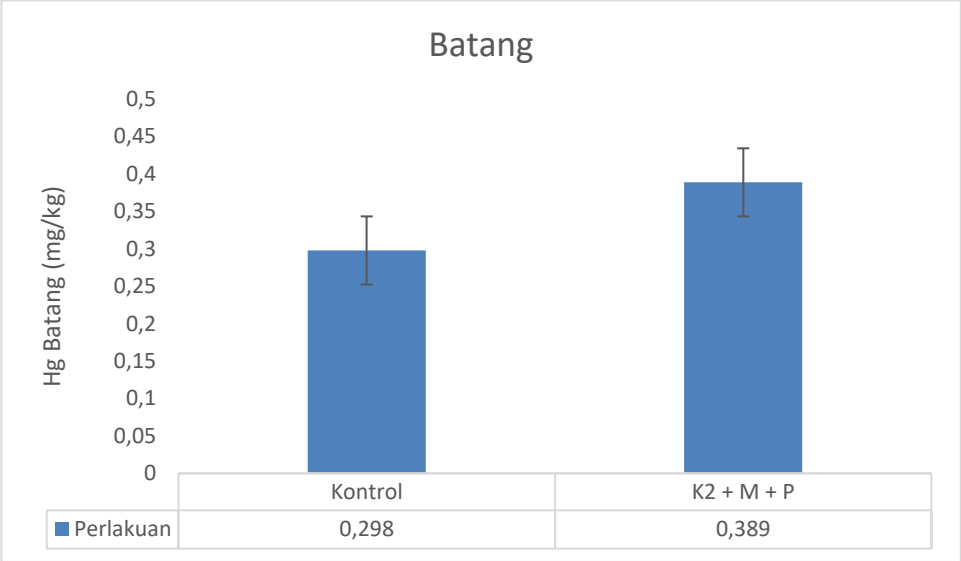


Gambar 4.10 Konsentrasi logam Hg tanah

4.3.2 Konsentrasi Logam Hg Batang

Pada **Gambar 4.11** menyajikan grafik hasil analisis konsentrasi logam berat Hg pada batang tanaman, yang dibandingkan antara tanah kontrol dan tanah dengan perlakuan K2 + M + P. Berdasarkan grafik tersebut, konsentrasi Hg pada batang tanaman di tanah kontrol tercatat sebesar 0,298 mg/kg. Sementara itu, pada perlakuan K2 + M + P, konsentrasi Hg menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu sebesar 0,389 mg/kg.

Data tersebut menunjukkan bahwa perlakuan K2 + M + P menghasilkan akumulasi merkuri pada batang yang lebih besar dibandingkan dengan kontrol. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa kombinasi perlakuan tersebut belum mampu menekan penyerapan atau translokasi logam berat Hg ke jaringan batang tanaman. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti perubahan sifat kimia tanah yang meningkatkan ketersediaan Hg, interaksi mikroorganisme dengan logam berat yang memengaruhi bentuk dan mobilitasnya, serta kemungkinan peningkatan serapan akibat perubahan sistem perakaran dan aktivitas biologis tanah.

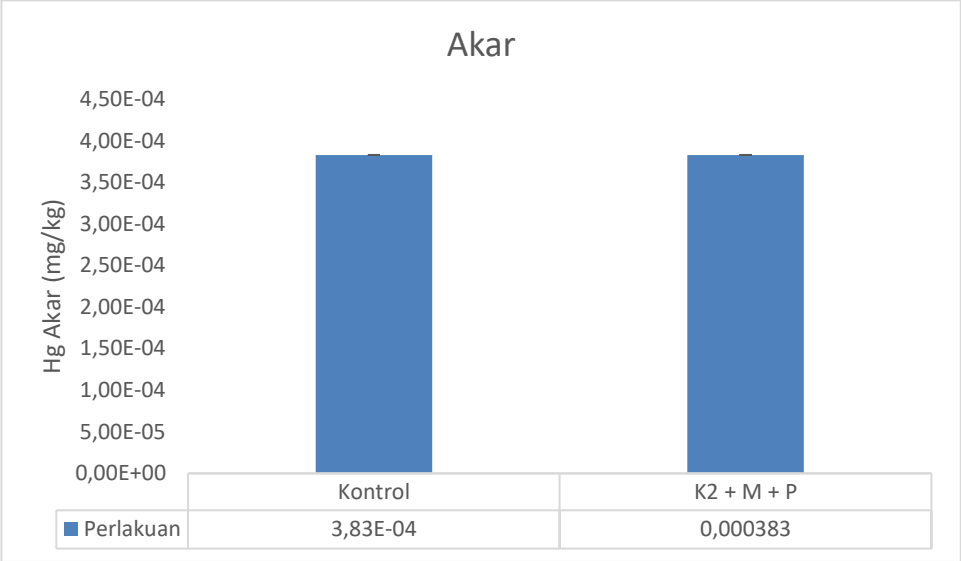


Gambar 4.11 Konsentrasi logam Hg batang

Dengan demikian, berdasarkan hasil pada gambar, perlakuan K2 + M + P belum menunjukkan efektivitas dalam menurunkan akumulasi merkuri pada batang tanaman dibandingkan dengan perlakuan kontrol.

4.3.3 Konsentrasi Logam Hg Akar

Pada **Gambar 4.12** memperlihatkan grafik hasil analisis konsentrasi logam berat Hg pada akar tanaman yang ditanam pada tanah kontrol dan tanah dengan perlakuan K2 + M + P. Berdasarkan data pada grafik, konsentrasi Hg pada akar tanaman di tanah kontrol tercatat sebesar $3{,}83 \times 10^{-4}$ mg/kg. Sementara itu, pada perlakuan K2 + M + P diperoleh nilai yang sedikit lebih tinggi, yaitu sebesar $3{,}88 \times 10^{-4}$ mg/kg. Selisih konsentrasi antara kedua perlakuan tersebut sangat kecil, sehingga perbedaannya dapat dikatakan tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian perlakuan K2 + M + P belum memberikan pengaruh yang nyata terhadap kadar merkuri yang terakumulasi pada akar tanaman.



Gambar 4.12 Konsentrasi logam Hg akar

Dengan demikian, meskipun perlakuan tertentu dapat memengaruhi distribusi Hg pada bagian tanaman lainnya, pada bagian akar perubahan konsentrasi yang terjadi relatif minimal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa mekanisme yang terjadi kemungkinan lebih berkaitan dengan proses imobilisasi atau perubahan bentuk Hg di dalam tanah, bukan pada peningkatan maupun penurunan serapan langsung oleh sistem perakaran tanaman (Muryani dkk., 2023).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian "Peran *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) terhadap Kualitas Tanah dan Pertumbuhan Cabai (*Capsicum frutescens* L.) pada Lahan Bekas Tambang Emas di Desa Kalirejo, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta**"** dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perlakuan kombinasi AMF dan PGPR dengan kompos serta sekam pada tanah bekas tambang emas mampu memperbaiki kualitas tanah, terutama melalui peningkatan kandungan dan serapan P_2O_5 serta menunjukkan potensi menurunkan konsentrasi Hg di tanah. Namun, perbaikan terhadap kadar air tanah belum menunjukkan perubahan yang signifikan dan kadar Hg masih berada di atas ambang batas aman.
2. Inokulasi AMF dan PGPR memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman cabai (Capsicum frutescens L.), yang ditunjukkan oleh peningkatan survival rate, tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun pada fase awal, serta biomassa tanaman dibandingkan kontrol, meskipun akumulasi Hg pada jaringan tanaman masih menunjukkan variasi.Terhadap parameter kadar air tanah, perlakuan K2 + M + P belum menunjukkan perubahan yang signifikan dibandingkan kontrol, sehingga perbaikan sifat fisik tanah khususnya dalam kemampuan menahan air masih perlu ditingkatkan.

Secara keseluruhan, kombinasi kompos, sekam, AMF, dan PGPR menunjukkan potensi sebagai strategi rehabilitasi biologis dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman cabai dan memperbaiki kualitas tanah pada lahan bekas tambang emas, meskipun efektivitasnya dalam menekan akumulasi logam berat pada jaringan tanaman masih memerlukan optimasi.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian ini agar hasil yang didapatkan lebih optimal adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan periode pengamatan yang lebih panjang untuk mengetahui efektivitas jangka panjang perlakuan K2 + M + P terhadap stabilisasi logam berat dan produktivitas tanaman.
2. Disarankan untuk melakukan variasi dosis kompos, sekam, AMF, dan PGPR guna menentukan komposisi optimal dalam meningkatkan kualitas tanah sekaligus menekan akumulasi Hg pada jaringan tanaman.
3. Perlu dilakukan analisis fraksionasi logam berat dalam tanah untuk mengetahui bentuk kimia Hg yang dominan (tersedia atau tidak tersedia), sehingga mekanisme imobilisasi dapat dipahami secara lebih komprehensif.

4. Disarankan untuk menambahkan tanaman hiperakumulator atau metode remediasi tambahan sebagai kombinasi strategi fitoremediasi guna menurunkan kadar Hg hingga mendekati ambang batas aman lingkungan.
5. Pemerintah daerah dan masyarakat setempat perlu mempertimbangkan penerapan teknologi bioremediasi berbasis mikroba dan bahan organik ini sebagai salah satu alternatif rehabilitasi lahan bekas tambang emas secara berkelanjutan, dengan tetap memperhatikan aspek keamanan pangan dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Agustiani, T., Sulistia, S., Sudaryanto, A., Kurniawan, B., Poku, P. A., Elwaleed, A., Kobayashi, J., Ishibashi, Y., Anan, Y., & Agusa, T. (2025). Mercury Contamination and Human Health Risk by Artisanal Small-Scale Gold Mining (ASGM) Activity in Gunung Pongkor, West Java, Indonesia. *Earth*, *6*(3), 67. https://doi.org/10.3390/earth6030067

Ahmad Nazari, Y., Rahmawati, Y., Noor, A., Dirgahayu Ningsih, R., Pertanian Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru Kalimantan Selatan, F., Pengawasan dan Sertifikasi Benih Tanaman Pangan dan Hortikultura, B., Kalimantan Selatan, B., & Riset dan Inovasi Nasional, B. (2023). *IDENTIFIKASI POTENSI VARIETAS CABAI RAWIT TIUNG TANJUNG SEBAGAI VARIETAS UNGGUL NASIONAL Identification of Tiung Tanjung Chilli Variety Potential as a National Superior Variety*. *19*(3), 112–120.

Amgain, N. R., Fan, Y., VanWeelden, M. T., Rabbany, A., & Bhadha, J. H. (2022). From Ground to Grain: Tracing Phosphorus and Potassium in Flooded Rice Cultivar Grown on Histosols. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(8), 1–10. https://doi.org/10.3390/agriculture12081250

An' Amta, D. A. A. (2023). Analisis Konflik Vertikal Pertambangan Emas Tanpa Izin di Desa Kalirejo Kabupaten Kulon Progo. *PADARINGAN (Jurnal Pendidikan Sosiologi Antropologi)*, *5*(02), 93. https://doi.org/10.20527/pn.v5i02.8259

Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, *871*(October), 1–17. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

Bimasri, J., & Murniati, M. (2024). *RADIKULA : Jurnal Ilmu Pertanian Pemberian Biosilika Sekam Padi Pada Tanah Entisol Untuk Budidaya Tanaman Jagung*. *3*(1), 1–8.

Bouida, L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A. M., Alorfi, H. S., & Hussein, M. A. (2022). Mechanism , Health Effects and Remediation Methods. *Water Review*, *14*(28 October), 1–26.

Briglia, N., Petrozza, A., Hoeberichts, F. A., Verhoef, N., & Povero, G. (2019). Investigating the impact of biostimulants on the row crops corn and soybean using high-efficiency phenotyping and next generation sequencing. *Agronomy*, *9*(11), 1–15. https://doi.org/10.3390/agronomy9110761

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, *173*(4), 677–702. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x

Chen, D., Saeed, M., Ali, M. N. H. A., Raheel, M., Ashraf, W., Hassan, Z., Hassan, M. Z., Farooq, U., Hakim, M. F., Rao, M. J., Naqvi, S. A. H., Moustafa, M., Al-Shehri, M., & Negm, S. (2023). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Combined Application Reveals Enhanced Soil Fertility and Rice Production. *Agronomy*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/agronomy13020550

Farhad, M., Noor, M., Yasin, M. Z., Nizamani, M. H., Turan, V., & Iqbal, M. (2024). Interactive Suitability of Rice Stubble Biochar and Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Improving Wastewater-Polluted Soil Health and Reducing Heavy Metals in Peas. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(2). https://doi.org/10.3390/su16020634

Forand, A. D., Finfrock, Y. Z., Lavier, M., Stobbs, J., Qin, L., Wang, S., Karunakaran, C., Wei, Y., Ghosh, S., & Tanino, K. K. (2022). With a Little Help from My Cell Wall: Structural Modifications in Pectin May Play a Role to Overcome Both Dehydration Stress and Fungal Pathogens. *Plants*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/plants11030385

Haghighizadeh, A., Rajabi, O., Nezarat, A., Hajyani, Z., Haghmohammadi, M., Hedayatikhah, S., Asl, S. D., & Aghababai Beni, A. (2024). Comprehensive analysis of heavy metal soil

contamination in mining Environments: Impacts, monitoring Techniques, and remediation strategies. *Arabian Journal of Chemistry*, *17*(6), 105777. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105777

Indriyani, S., & Darlis, V. V. (2024). Pengaruh pemberian pupuk kompos terhadap pertumbuhan semai sengon (Falcataria moluccana) pada media tanam bekas tambang emas. *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*, *8*(2), 19. https://doi.org/10.32522/ujht.v8i2.12369

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, *7*(2), 60–72. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

Liu, Y., Gao, J., Zhao, Y., Fu, Y., Yan, B., Wan, X., Cheng, G., & Zhang, W. (2024). Effects of different phosphorus and potassium supply on the root architecture, phosphorus and potassium uptake, and utilization efficiency of hydroponic rice. *Scientific Reports*, *14*(1), 1–16. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72287-1

Lu, Y., Cheng, J., Wang, J., Zhang, F., Tian, Y., Liu, C., Cao, L. and, & Zhou, Y. (2022). Efficient Remediation of Cadmium Contamination in Soil by. *Processes*.

Ma, Y., Ankit, Tiwari, J., & Bauddh, K. (2022). Plant-Mycorrhizal Fungi Interactions in Phytoremediation of Geogenic Contaminated Soils. *Frontiers in Microbiology*, *13*(February). https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.843415

Mei, L., Zhu, Y., Zhang, X., Zhou, X., Zhong, Z., Li, H., Li, Y., Li, X., Daud, M. K., Chen, J., & Zhu, S. (2021). Mercury-induced phytotoxicity and responses in upland cotton (Gossypium hirsutum l.) seedlings. *Plants*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/plants10081494

Nyong, E. C., Zaia, S. R., Allué-Guardia, A., Rodriguez, A. L., Irion-Byrd, Z., Koenig, S. S. K., Feng, P., Bono, J. L., & Eppinger, M. (2020). Pathogenomes of Atypical Non-shigatoxigenic Escherichia coli NSF/SF O157:H7/NM: Comprehensive Phylogenomic Analysis Using Closed Genomes. *Frontiers in Microbiology*, *11*(April), 1–23. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00619

Pradhan, N., Singh, S., Saxena, G., Pradhan, N., Koul, M., Kharkwal, A. C., & Sayyed, R. (2025). A review on microbe–mineral transformations and their impact on plant growth. *Frontiers in Microbiology*, *16*(July). https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1549022

Riyazuddin, R., Nisha, N., Ejaz, B., Khan, M. I. R., Kumar, M., Ramteke, P. W., & Gupta, R. (2022). A comprehensive review on the heavy metal toxicity and sequestration in plants. *Biomolecules*, *12*(1), 1–26. https://doi.org/10.3390/biom12010043

Salam, M. M. A., Ruhui, W., Sinkkonen, A., Pappinen, A., & Pulkkinen, P. (2022). Effects of Contaminated Soil on the Survival and Growth Performance of European (Populus tremula L .) and Hybrid. *Plants*, *11*, 1970.

Santoso, D. H., & Gomareuzzaman, M. (2022). KELAYAKAN TEKNIS PENAMBANGAN EMAS PADA WILAYAH PERTAMBANGAN RAKYAT Studi Kasus: Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo. *Science Tech: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi*, *4*(1), 19–28. https://doi.org/10.30738/jst.v4i1.2480

Sofiarani, F. N., & Ambarwati, E. (2020). Pertumbuhan dan Hasil Cabai Rawit (Capsicum frutescens L.) pada Berbagai Komposisi Media Tanam dalam Skala Pot. *Vegetalika*, *9*(1), 292. https://doi.org/10.22146/veg.44996

Tamma, A. A., Lejcuś, K., Fiałkiewicz, W., & Marczak, D. (2025). Advancing Phytoremediation: A Review of Soil Amendments for Heavy Metal Contamination Management. *Sustainability (Switzerland)*, *17*(13). https://doi.org/10.3390/su17135688

Thiyageshwari, S., Gayathri, P., Krishnamoorthy, R., Anandham, R., & Paul, D. (2018). Exploration of rice husk compost as an alternate organic manure to enhance the productivity of blackgram in typic haplustalf and typic rhodustalf. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/ijerph15020358

Washington State University Extension. (2014). A Home Gardener ' s Guide to Soils and Fertilizers. *Washington State University Extension*. http://pubs.wsu.edu/

Wei, W., Li, K., Li, C., Wang, S., Li, L., Xie, J., Li, T., Zhou, Z., Zhang, S., Pu, Y., Jia, Y., Liu, X., Xu, X., & Wang, G. (2025). Enhancing Soil Phosphorus and Potassium Availability in Tea Plantation: The Role of Biochar, PGPR, and Phosphorus- and Potassium-Bearing Minerals. *Agronomy*, *15*(6), 1–16. https://doi.org/10.3390/agronomy15061287

Wu, X., Cobbina, S. J., Mao, G., Xu, H., Zhang, Z., & Yang, L. (2016). A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(9), 8244–8259. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6333-x

Yihune, E., & Addisu, S. (2024). Assessment of Physicochemical Properties and Heavy Metal Content of Floriculture Soil in Amhara Region of Northwest Ethiopia. *Scientific World Journal*, *2024*. https://doi.org/10.1155/2024/9945257

Zheng, X., Lin, H., Du, D., Li, G., Alam, O., Cheng, Z., Liu, X., Jiang, S., & Li, J. (2024). Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *284*(April), 116883. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116883

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi kegiatan sampling









Lampiran 2. Dokumentasi kegiatan penanaman









Lampiran 3. Dokumentasi kegiatan perawatan tanaman









Lampiran 4. Dokumentasi tanaman sebelum dan sesudah panen









Lampiran 5. Dokumentasi laboratorium







