

TESIS
**POTENSI ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI DAN PLANT
GROWTH PROMOTING RHIZOBACTERIA PADA TANAMAN *Ochroma
grandiflorum* rowlee DAN *Samanea saman* TERHADAP SERAPAN Zn
SERTA KETERSEDIAAN C-ORGANIK DI TANAH TPA PIYUNGAN**

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan



INDAH FATHIKASARI
22927008

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA YOGYAKARTA
2025

TESIS
*Potensi Arbuscular Mycorrhizal Fungi dan Plant Growth Promoting
Rhizobacteria pada Tanaman Ochroma grandiflorum rowlee dan Samanea
saman Terhadap Serapan Logam Zn serta Ketersediaan C-organik di
Tanah TPA Piyungan*

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan



INDAH FATHIKASARI
22927008

Disetujui,
Dosen Pembimbing

Dewi Wulandari, S. Hut., M.Agr., Ph.D.
NIK. 185130401

Tanggal: 27/5 2025

Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Teknik Lingkungan FTSP UII



Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., I.P.M.

NIK. 025100407

Tanggal: 27/5 2025

HALAMAN PENGESAHAN

Potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* pada Tanaman *Ochroma grandiflorum* rowlee dan *Samanea saman* Terhadap Serapan Logam Zn serta Ketersediaan C-organik di Tanah TPA Piyungan

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji


Hari: *Senin*
Tanggal: *26/5 2025*

Disusun Oleh:


INDAH FATHIKASARI
22927008

Tim Penguji:

Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., PhD

() *26/5 - 2025*

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

() *26/5 ' 2025*

Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng.

() *26/5-25.*

PERNYATAAN

Dengan ini saya 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 adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian 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. Program software komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggungjawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 20 Mei 2025
Yang membuat pernyataan,



Indah Fathikasari
NIM: 22927008

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “*Potensi Arbuscular Mycorrhizal Fungi dan Plant Growth Promoting Rhizobacteria pada Tanaman Ochroma grandiflorum rowlee dan Samanea saman Terhadap Serapan Logam Zn serta Ketersediaan C-organik di Tanah TPA Piyungan*”.

Penyusunan laporan tesis ini tidak akan terselesaikan tanpa dukungan, bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Dengan rasa hormat dan tulus, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala, atas nikmat kesehatan, kekuatan, dan kesempatan yang diberikan kepada penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.
2. Orang tua, keluarga tercinta, dan sepupu yang senantiasa memberikan dukungan moril, materil, serta doa yang tiada henti selama proses perencanaan, pelaksanaan penelitian, hingga penulisan laporan ini.
3. Ibu Dewi Wulandari, S.Hut., M.Agr., Ph.D., selaku dosen pembimbing, atas arahan, bimbingan, dan dukungan yang penuh kesabaran dari tahap awal penelitian hingga penyusunan laporan ini.
4. Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. dan Bapak Dr. Joni Aldilla Fajri, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji, atas arahan, bimbingan, dan dukungan dalam penyusunan laporan ini.
5. Bapak dan Ibu laboran di Laboratorium Kualitas Lingkungan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, atas bantuan, bimbingan, serta fasilitas yang diberikan selama proses penelitian di laboratorium.
6. Rekan-rekan peneliti, khususnya tim TPA PIYUNGAN, atas kerja sama, semangat, dan kontribusi luar biasa yang telah membantu kelancaran penelitian ini.
7. Teman-teman MTL (terkhusus Kak Erdina, Kak Mawas, dan Kak Lisa), *Support System 24/7* (Intan, Candra dan Qori), Ruang Rindu (Safira, Mega, Astri, dan Dhimas) dan Lesi, atas doa, dukungan, serta kebersamaan yang senantiasa menghadirkan semangat dan keceriaan di tengah proses penyusunan tugas akhir ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas bantuan, dukungan, dan doa yang telah diberikan selama proses penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan menjadi referensi yang berguna untuk penelitian selanjutnya.

Yogyakarta, 20 Mei 2025

Indah Fathikasari

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRAK

INDAH FATHIKASARI. Potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* Dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* Pada Tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* Dan *Samanea Saman* Terhadap Serapan Logam Zn Serta Ketersediaan C-organik Di Tanah Tpa Piyungan. Dibimbing oleh DEWI WULANDARI, S. Hut., M. Agr., Ph.D.

Tanah TPA Piyungan mengandung logam berat Zn yang tinggi dan rendahnya C-organik yang dapat mempengaruhi kualitas serta keseimbangan ekosistem tanah. Teknologi bio-fitoremediasi, kombinasi tanaman dan mikroorganisme, menjadi alternatif yang potensial untuk mengatasi pencemaran ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* dan *Samanea saman*, serta efektivitasnya dalam menyerap Zn dan meningkatkan kandungan C-organik di tanah TPA Piyungan. Penelitian dilakukan dalam skala rumah kaca dengan 4 perlakuan pada setiap tanaman, kontrol, kombinasi AMF (*Acaulospora sp.*) dan PGPR, AMF, serta PGPR. Parameter yang diamati meliputi tinggi, diameter batang, biomassa, serapan Zn oleh jaringan tanaman, serta perubahan kandungan Zn dan C-organik di tanah setelah bio-fitoremediasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya tanaman *Samanea saman* saja mampu mereduksi logam berat hingga 60,64%. Penambahan inokulasi PGPR pada *Samanea saman* membantu tinggi tanaman (92,08 cm), diameter (7,74 mm), berat kering (16,83 g), dan tanaman melalui mekanisme fitostabilisasi menyerap logam pada bagian batang sebesar 41,65 mg/kg dan akar sebesar 76,18 mg/kg, efisiensi penyisihan pada tanah mencapai 42,57% serta penambahan konsentrasi C-organik di tanah 54,55% dari kondisi semula. Sedangkan pada *Ochroma grandiflorum rowlee* perlakuan *Acaulospora sp.* membantu pertumbuhan tinggi tanaman (41,40 cm), diameter (5,53 mm), berat kering (4,81 g) serta membantu tanaman menyerap Zn dengan mekanisme fitostabilisasi menyerap logam pada bagian batang sebesar 79,02 mg/kg dan akar sebesar 55,02 mg/kg, efisiensi removal dari tanah sebesar 59,14 % dan peningkatan C-organik di tanah 16% dari kondisi semula. Penambahan kombinasi *Acaulospora sp.* dan PGPR pada tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* mampu meningkatkan ketersediaan C-organik di tanah hingga 64,65% dari kondisi semula. Dengan demikian, perlakuan inokulasi secara individu *Acaulospora sp.* dan PGPR menunjukkan keuntungan yang lebih unggul dalam parameter pertumbuhan daripada perlakuan dengan inokulasi kombinasi atau tanaman saja. Dalam beberapa parameter seperti efisiensi penyisihan, dan ketersediaan C-organik di tanah lebih unggul apabila di inokulasi baik kombinasi *Acaulospora sp.* dan PGPR maupun tanaman saja.

Kata kunci: *Acaulospora sp.*, AMF, Bio-fitoremediasi, C-organik, logam berat Zn, *Ochroma grandiflorum rowlee*, PGPR, *Samanea saman*.

ABSTRACT

INDAH FATHIKASARI. The Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Plant Growth Promoting Rhizobacteria in *Ochroma grandiflorum* rowlee and *Samanea saman* for Zn Uptake and Organic Carbon Availability in TPA Piyungan Soil.

Supervised by DEWI WULANDARI, S. Hut., M. Agr., Ph.D.

The soil of TPA Piyungan contains high levels of heavy metal Zn and low levels of C-organic which can affect the quality and balance of the soil ecosystem. Bio-phytoremediation technology, a combination of plants and microorganisms, is a potential alternative to overcome this pollution. This study aims to determine the potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) in increasing the growth of *Ochroma grandiflorum* rowlee and *Samanea saman* plants, as well as their effectiveness in absorbing Zn and increasing the C-organic content in the soil of TPA Piyungan. The study was conducted on a greenhouse scale with 4 treatments for each plant, control, combination of AMF (*Acaulospora* sp.) and PGPR, AMF, and PGPR. The parameters observed included height, stem diameter, biomass, Zn absorption by plant tissue, and changes in Zn and C-organic content in the soil after bio-phytoremediation. The results showed that only the *Samanea saman* plant was able to reduce heavy metals by 60.64%. The addition of PGPR inoculation on *Samanea saman* helps plant height (92.08 cm), diameter (7.74 mm), dry weight (16.83 g), and plants through the phytostabilization mechanism absorb metals in the stem section of 41.65 mg/kg and roots of 76.18 mg/kg, the efficiency of removal in the soil reaches 42.57% and the addition of C-organic concentration in the soil is 54.55% from the original condition. While in *Ochroma grandiflorum rowlee*, *Acaulospora* sp. treatment helps plant height growth (41.40 cm), diameter (5.53 mm), dry weight (4.81 g) and helps plants absorb Zn with the phytostabilization mechanism absorbing metals in the stem section of 79.02 mg/kg and roots of 55.02 mg/kg, removal efficiency from the soil of 59.14% and an increase in C-organic in the soil of 16% from the original condition. The addition of a combination of *Acaulospora* sp. and PGPR to *Ochroma grandiflorum* rowlee plants can increase the availability of C-organic in the soil up to 64.65% of the original condition. Thus, the individual inoculation treatment of *Acaulospora* sp. and PGPR showed superior benefits in growth parameters than the treatment with combination inoculation or plants alone. In several parameters such as removal efficiency, and the availability of C-organic in the soil is superior when inoculated with either a combination of *Acaulospora* sp. and PGPR or plants only.

Keywords: *Acaulospora* sp., AMF, Bio-phytoremediation, C-organic, heavy metal Zn, *Ochroma grandiflorum rowlee*, PGPR, *Samanea saman*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Hipotesis	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Pencemaran Tanah	5
2.2. Logam Berat	5
2.3. C-Organik	7
2.4. Bio-Fitoremediasi	7
2.5. Tanaman Uji	9
2.5.1. <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	9
2.5.2. <i>Samanea saman</i>	9
2.6. Mikroorganisme	10
2.6.1. <i>Arbuscular Mikoriza Fungi</i>	10
2.6.2. <i>Plant Growth Promoting Rhizobacteria</i>	11
2.6.3. Peran Kombinasi AMF dan <i>Plant Growth Promoting Rhizobacteria</i>	12
2.7. Penelitian Terdahulu	14
BAB III METODE	18
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	18
3.1.1. Pengambilan sampel tanah dan persiapan media tanam	20
3.1.2. Persiapan inokulum PGPR dan AMF	20
3.1.3. Penanaman tanaman dan inokulasi PGPR dan AMF ke tanaman	21
3.1.4. Pemeliharaan, pengukuran dan pemanenan	22
3.2. Analisis Data	23
3.2.1. Analisis Kandungan Zn pada Tanah, Jaringan Akar dan Batang	23
3.2.2. Analisis kandungan C-organik pada tanah	23

3.2.3.	Karakter serapan logam pada tanaman.....	25
3.2.4.	Analisis statistik data.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		27
4.1.	Parameter Pertumbuhan Tanaman.....	27
4.1.1.	Tinggi tanaman <i>Samanea saman</i>	27
4.1.2.	Tinggi tanaman <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	29
4.1.3.	Perbandingan Tinggi Dua tanaman	30
4.1.4.	Diameter tanaman <i>Samanea saman</i>	31
4.1.5.	Diameter tanaman <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	33
4.1.6.	Perbandingan diameter dua tanaman.....	35
4.2.	Biomassa tanaman pada jaringan tanaman.....	36
4.2.1.	Berat kering tanaman <i>Samanea Saman</i>	36
4.2.2.	Berat kering tanaman <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	37
4.2.3.	Perbandingan berat kering dua tanaman	38
4.3.	Serapan Zn pada jaringan tanaman pasca bio-fitoremediasi	39
4.3.1	Serapan Zn oleh jaringan <i>Samanea saman</i>	39
4.3.2	Serapan Zn oleh jaringan <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	41
4.3.3	Perbandingan Serapan Zn oleh jaringan tanaman	42
4.3.4	Karakter serapan logam pada tanaman.....	43
4.4.	Penurunan Zn pada tanah pasca bio-fitoremediasi	46
4.4.1.	Penurunan konsentrasi Zn di tanah oleh <i>Samanea saman</i>	46
4.4.2.	Penurunan konsentrasi Zn di tanah oleh <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	47
4.4.3.	Perbandingan penurunan konsentrasi Zn di tanah.....	49
4.5.	Kadar C-organik	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		51
5.1.	Kesimpulan.....	51
5.2.	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA		52
LAMPIRAN		61
Lampiran 1:	Alat yang digunakan dalam penelitian	61
Lampiran 2:	Bahan yang digunakan dalam penelitian	62
Lampiran 3:	Analisa data uji sampel logam berat Zn	63
Lampiran 4:	Analisa data uji sampel C-organik.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu	14
Tabel 3. 1 Jumlah <i>colony</i> PGPR.....	20
Tabel 4. 1 Perbandingan tinggi tanaman <i>S. saman</i> dan <i>O. grandiflorum</i>	31
Tabel 4. 2 Perbandingan diameter tanaman <i>S. saman</i> dan <i>O. grandiflorum</i>	36
Tabel 4. 3 Perbandingan berat kering tanaman <i>S. saman</i> dan <i>O. grandiflorum</i>	39
Tabel 4. 4 Perbandingan konsentrasi Zn pada tanaman <i>S. saman</i> dan <i>O. grandiflorum</i>	43
Tabel 4. 5 Faktor biokonsentrasi dan translokasi logam berat pada tanaman	43
Tabel 4. 6 Konsentrasi logam Zn di tanah setelah biofitoremediasi	49
Tabel 4. 7 Konsentrasi logam Zn di tanah setelah biofitoremediasi	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mekanisme fitoremediasi	8
Gambar 3. 1 Lokasi Sampling	18
Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian.....	19
Gambar 3. 3 Tahapan Subkultur	20
Gambar 3. 4 Tahap Perbanyakkan AMF	21
Gambar 3. 5 Desain penelitian tanaman <i>S. saman</i> (a) dan <i>O. grandiflorum</i> (b)	22
Gambar 3. 6 Tahapan uji logam berat	23
Gambar 3. 7 Pengujian C – Organik.....	24
Gambar 4. 1 Hasil pengukuran tinggi <i>S. saman</i> tanaman dua belas minggu setelah tanam... 27	
Gambar 4. 2. Tinggi tanaman <i>S. saman</i> semua perlakuan (a) dan perlakuan kontrol serta PGPR (b).	28
Gambar 4. 3 Hasil pengukuran tinggi tanaman <i>O. grandiflorum</i> dua belas minggu setelah tanam.	29
Gambar 4. 4 Tinggi tanaman <i>O. grandiflorum</i> semua perlakuan (a) dan perbandingan tinggi kontrol serta <i>Acaulospora</i> sp (b).	30
Gambar 4. 5 Hasil pengukuran diameter tanaman <i>S. saman</i> dua belas minggu setelah tanam.	33
Gambar 4. 6 Diameter batang <i>S. saman</i> pada perlakuan Kontrol (K) dan PGPR (P)	33
Gambar 4. 7 Hasil pengukuran diameter tanaman <i>O. grandiflorum</i> dua belas minggu setelah tanam.	34
Gambar 4. 8 Perbandingan diameter tanaman <i>O. grandiflorum</i>	35
Gambar 4. 9 Perbandingan berat kering antara batang, akar, dan total tanaman <i>S. saman</i>	37
Gambar 4. 10 Perbandingan berat kering antara batang, akar, dan total <i>O.grandiflorum</i>	38
Gambar 4. 11 Perbandingan serapan Zn pada jaringan batang dan jaringan akar tanaman <i>S. saman</i>	40
Gambar 4. 12 Perbandingan serapan Zn pada jaringan batang dan jaringan akar tanaman <i>O. grandiflorum</i>	42
Gambar 4. 13 Reduksi Zn pasca biofitoremediasi <i>Samanea saman</i>	46

Gambar 4. 14 Konsentrasi Zn pada Tanah.	48
Gambar 4. 15. Ketersediaan C-organik pasca biofitoremediasi.	50

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Sampah menjadi permasalahan yang belum bisa terselesaikan, salah satunya di Daerah Istimewa Yogyakarta. Penanganan sampah yang kurang menimbulkan gangguan terhadap kondisi lingkungan di provinsi tersebut. TPA Piyungan menjadi tempat pemrosesan akhir wilayah Kabupaten Bantul, Kabupaten Sleman, dan Kota Yogyakarta. Pada tahun 2024 ini telah dilakukan penutupan karena adanya kelebihan kapasitas di TPA. Rerata sampah yang tidak dapat dikelola di skala rumah tangga, bank sampah, dan TPS 3R yaitu 800-2000 ton/hari (Pramiarsih et al., 2023). Jumlah timbunan yang masuk ke TPA Piyungan sebagian besar merupakan sampah organik dengan persentase 64,41% dan 35,59% sampah anorganik (Romy et al., 2023). Sampah yang masuk masih dalam kondisi tercampur antara organik dan anorganik sehingga sulit untuk terdekomposisi dengan baik (Pramiarsih et al., 2023).

Dekomposisi sampah di TPA menjadi faktor utama terjadinya pencemaran tanah yang berdampak pada peningkatan kandungan zat pencemar (Vatra dan Arifin, 2023). Hal ini terjadi karena adanya proses kontak antara lindi dengan tanah (Alam et al., 2020). Lindi memiliki sifat toksik yang didalamnya terdapat bahan organik (Meyrita et al., 2023). Bahan organik yang terkandung dapat berbentuk c-organik. Nilai C-organik dapat menentukan tingkat kesuburan tanah (Chairunnisya et al., 2017). Selain kandungan bahan organik, komponen logam berat juga terkandung logam berat (Meyrita et al., 2023). Logam berat terdapat dua jenis yaitu logam berat esensial dan non esensial. Logam berat esensial merupakan logam yang dibutuhkan oleh organisme namun, apabila dalam jumlah besar akan menjadi ancaman bagi makhluk hidup seperti Zn, Fe, Mn, dan lainnya. Logam tidak esensial yaitu logam yang tidak diketahui manfaatnya bahkan bersifat racun seperti Pb, Hg, Cd dan lainnya (Irhamni et al., 2017). Pada tanah TPA Piyungan telah dilakukan penelitian yang menunjukkan tanah di sekitar TPA telah tercemar Zn dengan nilai $101,2 \pm 9,8$ mg/kg (Muyassar dan Budianta, 2021). Adanya kandungan logam Zn yang di kemudian hari dapat terakumulasi menimbulkan yang berpotensi menimbulkan pencemaran dan C-organik yang berkurang maka, perlu perbaikan tanah dengan teknologi berupa gabungan dari fitoremediasi dan bioremediasi.

Fitoremediasi merupakan teknik remediasi yang memanfaatkan tanaman sebagai pereduksi kandungan logam di tanah. Pemilihan jenis tanaman perlu dipertimbangkan

dengan jenis tanaman yang dapat menyerap, mengakumulasi dan memetabolisme logam berat dalam tanah tercemar (Amalia et al., 2023). Jenis tanaman yang cocok untuk fitoremediasi diantaranya *Helianthus annuus L* dan *Melaleuca leucadendra*. Selain itu, penggunaan pepohonan kehutanan seperti *Ochroma grandiflorum rowlee* dan *Samanea saman* menjadi jenis tanaman yang dapat mereduksi kandungan logam berat di tanah. Penelitian terhadap *Ochroma grandiflorum rowlee* dan *Samanea saman* dalam reduksi Zn di tanah masih sedikit. Tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* biasa dimanfaatkan untuk bahan pembuatan pulp, isolator, dan pelampung kapal. Tanaman tersebut juga memiliki tergolong *fast growing* dan tanaman dengan jenis ini memiliki perakaran yang luas dan biomassa tinggi (Istiqomah et al., 2017). *Samanea saman* dimanfaatkan sebagai peneduh di tepi jalan, tepi sungai, dan hutan (Intan et al., 2023).

Bioremediasi merupakan pemanfaatan mikroorganisme sebagai upaya dalam menurunkan kandungan polutan di suatu lokasi yang terkontaminasi (Priadie et al., 2012). Mikroorganisme yang mampu melakukan remediasi logam berat diantaranya adalah bakteri (*Bacillus sp*, *Pseudomonas sp*, dan *Enterobacter sp.*); kapang (*Penicillium chrysogenum*, *Rhizopus stolonifer* dan *Aspergillus oryzae*); dan khamir, (*Saccharomyces cerevisiae*) (Rahadi et al., 2020).

Penelitian pada tanah TPA Piyungan yang memiliki kandungan polutan logam berat dan polutan lainnya masih sedikit dilaporkan. Untuk membantu pemulihan lahan di TPA dengan efektif, teknologi bio-fitoremediasi memiliki potensi untuk diaplikasikan. Adanya informasi mengenai bio-fitoremediasi menjadi referensi untuk melakukan pengembangan kajian yang dilakukan di skala rumah kaca dengan menggunakan *Arbuskular Mikoriza Fungi (AMF)*, *Rhizobacteria* Pada Tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* dan *Samanea saman* terhadap Serapan Logam Zn serta ketersediaan C-organik di Tanah TPA Piyungan.

1.2. Perumusan Masalah

Pencemaran Tanah TPA Piyungan menjadi masalah yang belum terselesaikan, sehingga diperlukan solusi untuk pemecahan masalah, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh AMF dan PGPR menguntungkan terhadap pertumbuhan tanaman *Samanea saman* dan *Ochroma grandiflorum rowlee*?
2. Bagaimana pengaruh AMF dan PGPR pada tanaman *Samanea saman* dan *Ochroma grandiflorum rowlee* menguntungkan terhadap reduksi serapan logam berat Zn, dan ketersediaan C-organik di tanah TPA Piyungan?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menginvestigasi pengaruh AMF dan PGPR menguntungkan terhadap pertumbuhan tanaman *Samanea saman* dan *Ochroma grandiflorum* rowlee.
2. Menginvestigasi pengaruh AMF dan PGPR pada tanaman *Samanea saman* dan *Ochroma grandiflorum* rowlee menguntungkan terhadap serapan logam berat Zn dan ketersediaan C-organik di TPA Piyungan.

1.4. Hipotesis

Dalam penelitian ini terdapat hipotesis awal:

1. Pertumbuhan: Terdapat pengaruh kombinasi AMF dengan PGPR pada peningkatan tinggi dan diameter tanaman *Samanea saman* dan *Ochroma grandiflorum* rowlee.
2. Serapan logam: Terdapat pengaruh kombinasi AMF dengan PGPR dalam membantu tanaman menyerap logam Zn.
3. Ketersediaan C-organik: Terdapat pengaruh kombinasi AMF dengan PGPR dan tanaman pada ketersediaan C-organik pada tanah uji.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai potensi bakteri dan mikoriza menguntungkan terhadap pertumbuhan tanaman.
2. Menjadi bahan acuan dalam melakukan perbaikan lahan dengan metode yang sama dan menjadi bahan acuan dalam penelitian serupa.
3. Menyediakan data ilmiah mengenai potensi *Samanea saman* dan *Ochroma grandiflorum* rowlee dalam fitoremediasi.
4. Menyediakan alternatif teknologi ramah lingkungan untuk mengurangi dampak negatif logam berat pada tanah dan ekosistem.

1.6. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah:

1. Pembuatan inokulum dengan prosedur standar sebelum pemindahan tanaman ke skala percobaan di rumah kaca.

2. Pengujian serapan logam berat Zn dilakukan pada akar, batang, dan daun tanaman untuk menilai efektivitas AMF dan PGPR dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap pencemaran logam berat.
3. Pengujian C-organik pada tanah dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kandungan karbon organik yang dipengaruhi oleh inokulasi AMF dan PGPR.
4. Penelitian ini dilakukan dalam skala rumah kaca untuk memfasilitasi pengendalian kondisi lingkungan, serta memungkinkan pemantauan yang lebih cermat terhadap parameter pertumbuhan tanaman dan kualitas tanah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pencemaran Tanah

Pencemaran tanah adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain ke dalam tanah oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas tanah turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan tanah tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya. Pencemaran terjadi biasa terjadi karena adanya kebocoran limbah cair atau bahan kimia industri, masuknya limbah ke tanah, atau penimbunan limbah (Muslimah, 2015). Saat zat pencemar masuk ke tanah dan mencemarinya, ia akan menguap dan tersapu oleh air hujan atau akan semakin meresap ke lapisan tanah lainnya. Kemudian zat pencemar akan mengendap sebagai zat kimia beracun dan dapat berdampak ke manusia apabila bersentuhan atau dapat mencemari komponen biotik maupun abiotik lainnya (Charlena et al., 2009).

Pencemaran tanah tidak hanya merusak ekosistem lokal, tetapi juga berkontribusi pada degradasi lahan secara luas di berbagai belahan dunia. Polutan seperti logam berat, senyawa organik beracun, dan bahan kimia industri telah terbukti menurunkan kualitas tanah, mengganggu aktivitas mikroorganisme, serta menyebabkan penurunan produktivitas pertanian (Aditya Putri, 2024). Konsentrasi polutan yang tinggi dalam tanah dapat berpindah ke rantai makanan melalui tanaman yang tumbuh di tanah tercemar, sehingga menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia yang mengonsumsinya (Agustina, 2014).

Secara global, diperkirakan sekitar 40% dari total lahan di dunia mengalami degradasi berat akibat aktivitas manusia, seperti pembuangan limbah, pertanian intensif, dan urbanisasi. Sementara itu, hampir setengah dari lahan lainnya berada dalam kondisi terdegradasi sedang, yang menandakan urgensi untuk mengelola dan memulihkan kesehatan tanah secara berkelanjutan (Wahyunto dan Dariah, 2014).

2.2. Logam Berat

Logam berat salah satu kontaminan yang mencemari tanah. Logam berat merupakan kelompok unsur logam yang memiliki massa jenis lebih dari 5 gr/cm^3 yang pada kondisi tertentu menjadi racun (Supriyantini et al., 2015). Logam berat yang umumnya terdapat dalam lindi limbah padat dan TPA. Ketika sampah dibakar atau dibuang di tempat terbuka, senyawa kimia beracun seperti logam berat dan senyawa organik lainnya akan lepas ke atmosfer dan lingkungan. Sejauh ini, lindi yang berasal dari tempat pembuangan sampah telah terbukti melepaskan logam beracun ke lingkungan. Hal ini menempatkan

tanah dan air tanah di sekitarnya, serta air permukaan, dalam bahaya yang signifikan. Logam berat dapat menyebabkan masalah kesehatan masyarakat seperti toksisitas akut, karsinogenesis, dan mutagenesis, serta efek negatif lainnya pada pertumbuhan organisme darat dan akuatik setelah menjadi bioakumulatif di lingkungan (Arini dan Rampe., 2022). Beberapa logam yang sering terkandung dalam air lindi diantaranya adalah kobalt (Co), tembaga (Cu), seng (Zn), mangan (Mn), besi (Fe) yang merupakan hara mikro esensial dan timbal (Pb), kadmium (Cd), kromium (Cr), yang merupakan hara mikro non-esensial bagi tanaman. Pada pH tertentu logam-logam tersebut dapat mengendap setelah mengalami oksidasi. Apabila logam tersebut sampai masuk ke dalam tubuh manusia itu akan sangat berbahaya bagi kesehatan tubuh (Noor et al., 2013).

Logam berat seng (Zn) merupakan salah satu logam berat yang banyak ditemukan di kerak bumi dengan rerata konsentrasinya 10-100 mg/ kg dan dilaporkan sebagai logam esensial bagi pertumbuhan makhluk hidup (Mertens dan Smolders., 2013). Seiring dengan sifat esensialnya, Zn juga memiliki sifat toksik dengan konsentrasi lebih dari 100 mg/kg di tanah (Schulte, 2004). Zn merupakan salah satu logam berat yang paling mudah ditemukan di dalam tanah. Jika kadarnya berlebihan, logam ini dapat menimbulkan efek fitotoksik yang dapat secara drastis mempengaruhi kualitas dan hasil panen, dan bahkan menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia jika dikonsumsi karena akumulasi Zn melalui penyerapan atau pengendapan (Baran, 2012; Wang et al., 2007). Lebih jauh lagi, tingkat Zn yang berlebih di dalam tanah juga berkontribusi terhadap penghambatan dan perubahan mikroorganisme tanah (Olaniran et al., 2013), karena seng dalam tanah bisa tersedia dalam bentuk ion (Zn^{2+}) maupun sebagai bagian dari senyawa kompleks organo-logam, yang membuatnya mudah terserap oleh organisme (Baran et al., 2018).

Pada kondisi tanah yang memiliki pH asam (rendah), seng (Zn) menjadi lebih mudah larut dalam air tanah. Hal ini membuat Zn sedikit lebih tersedia bagi tanaman dibandingkan pada tanah yang netral atau basa. Namun, meskipun lebih larut, pergerakan Zn dalam tanah yang asam tetap terbatas, terutama jika Zn dalam bentuk kompleks organik. Kompleks organik Zn ini hanya mengalami sedikit pergerakan atau pencucian (leaching), sehingga Zn cenderung tetap berada di dekat area tempat ia diberikan (Alvarez et al., 2001). Dalam tanah asam, sifat tanah yang padat atau berliat juga dapat memperlambat pergerakan Zn ke lapisan yang lebih dalam. Jadi, meskipun pH rendah membantu Zn menjadi lebih mudah larut, bukan berarti Zn akan berpindah jauh di dalam tanah. Sebaliknya, Zn akan tetap berada di sekitar permukaan tanah dan hanya bisa dimanfaatkan jika akar tanaman tumbuh mendekatinya.

2.3.C-Organik

Tingkat kesuburan tanah merupakan kunci untuk proses pembudidayaan tanaman dengan nilai ketersediaan unsur hara. Semakin tinggi ketersediaan hara tanaman maka semakin subur tanah dan juga sebaliknya. Kondisi hara pada tanah dapat berubah bergantung pada musim, pengelolaan tanah dan jenis tanaman yang digunakan (Lal, 2006). Salah satu unsur hara yang berperan penting dalam penyusunan bahan organik di tanah. Pada ekosistem tanah, C-organik menjadi komponen penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan menjadi sumber energi untuk mikroorganisme tanah. Nilai C-organik di berbagai ekosistem, jenis tanah dan kedalaman tanah di Indonesia berkisar 5,7-6,392 mg/ha (Agus et al., 2016). Nilai C-organik menurun seiring bertambahnya kedalaman tanah. Kondisi ini disebabkan oleh kebiasaan petani yang mengaplikasikan bahan organik dan serasah daun pada permukaan tanah, sehingga mengakibatkan bahan organik terakumulasi di bagian atas tanah dan sebagian tersapu ke lapisan yang lebih dalam. Nilai C-organik pada lapisan tanah atas lebih tinggi dibandingkan pada lapisan bawah tanah dan tanah di dalamnya (Sipahutar et al, 2014).

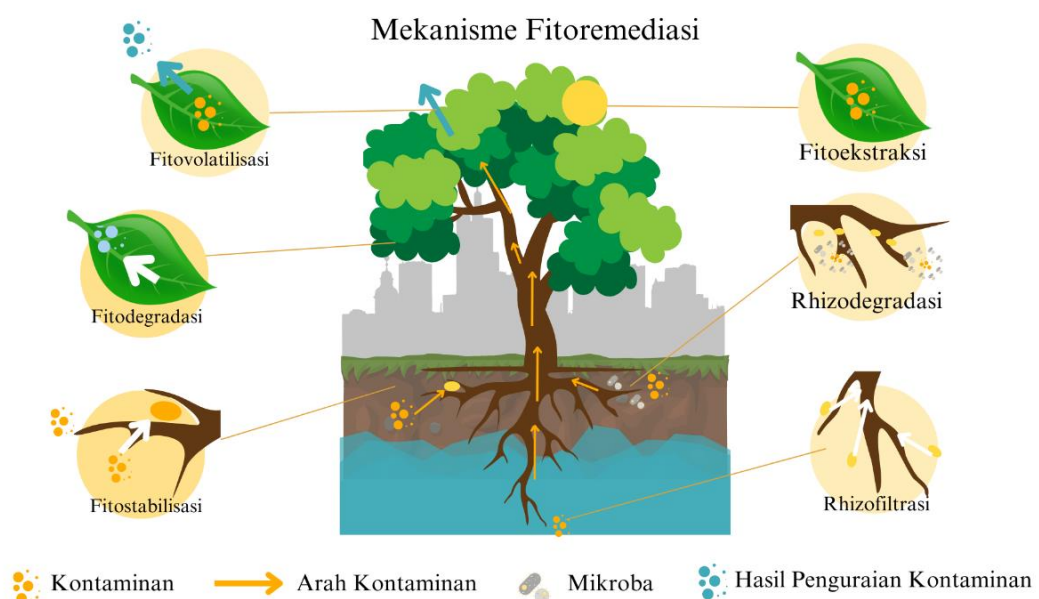
Dalam petunjuk teknis kimia tanah Eviati et al. (2023), terdapat beberapa kriteria untuk kandungan C-organik di tanah. Tanah dengan nilai C-organik < 1% dapat dikategorikan ke kondisi sangat rendah, 1-2% dalam kategori rendah, 2-3% sedang, 3-5% tinggi, dan > 5% sangat tinggi.

2.4.Bio-Fitoremediasi

Bio-Fitoremediasi merupakan pengelolaan lingkungan yang memanfaatkan kemampuan tanaman dalam mereduksi kontaminan. Proses ini melibatkan tanaman (fitoremediasi) dan mikroorganisme (bioremediasi) yang berinteraksi satu sama lain. Efektivitas mekanisme biofitoremediasi dipengaruhi beberapa faktor yaitu jenis tanaman, jenis kontaminasi, kondisi lingkungan, sistem penanaman, desain, dan durasi perawatan (Rossiana et al., 2023). Mikroba membantu tanaman untuk melindungi tanaman dari kontaminan, menyerap, mengakumulasi, merombak, atau mendegradasi kontaminan dari lingkungan seperti tanah dan air. Dalam fitoremediasi terdapat mekanisme yang mencakup:

1. Fitodegradasi merupakan proses penyerapan polutan oleh tanaman dan kemudian polutan mengalami metabolisme di dalam tanaman yang melibatkan enzim nitroductase, laccase, dehalogenase, oksigenase, dan nitrilase (Juhriah dan Alam, 2016)

2. Fitoekstraksi merupakan penyerapan logam toksik oleh akar tanaman diikuti oleh translokasi logam yang diserap ke pucuk dan pengendapan di vakuola, dinding sel, membran sel, dan bagian lain yang tidak aktif secara metabolik di jaringan tanaman (Suharjo dan Ernawati, 2022).
3. Rhizofiltrasi merupakan proses adsorpsi ke akar tanaman atau penyerapan logam berat oleh tanaman dan hanya diakumulasi pada system perakaran (Suharno dan Sancayaningsih, 2013) Mekanisme ini digunakan untuk memulihkan air tanah yang diekstraksi, air permukaan, dan air limbah dengan konsentrasi polutan yang rendah.
4. Fitostabilisasi merupakan mekanisme dapat dicapai melalui inaktivasi atau immobilisasi racun atau polutan di dalam akar atau di rizosfer. Aktivitas stabilisasi akar tanaman membatasi mobilitas dan bioavailabilitas kontaminan yang mengakibatkan penurunan efek toksik. Beberapa tanaman membentuk residu terikat kontaminan beracun yang tidak tersedia lebih lanjut dalam bentuk beracun atau tidak dapat dilepaskan dari matriks padat setelah akumulasi (Etim et al, 2012)
5. Fitovolatilisasi merupakan proses tanaman mengambil kontaminan dari tanah dan mengubah bahan kimia yang sukar menguap menjadi mudah menguap dan melepaskan kontaminan ke atmosfer melalui proses penguapan (Sukono et al., 2020).
6. Rhizodegradasi merupakan mekanisme penguraian kontaminan secara alami oleh akar tanaman. Mikroba pada akar tanaman berperan memecah kontaminan organik atau di demineralisasi menjadi zat-zat organik (Yulianto et al., 2021).



Gambar 2. 1 Mekanisme fitoremediasi

2.5. Tanaman Uji

2.5.1. *Ochroma grandiflorum rowlee*

Ochroma grandiflorum rowlee merupakan tanaman pohon dengan tinggi yang dapat mencapai 35 M dan daun berbentuk bundar telur dengan bunga kuning kehijauan. *O. grandiflorum* termasuk dalam suku Bombacaceae yang berasal dari Brasil dan Ekuador, pada umumnya pohon balsa tumbuh baik di dataran rendah sampai ketinggian 500 Mdpl (Charomaini et al., 2005). Penggunaan jenis pohon kehutanan seperti Balsa dikenal dengan jenis tanaman yang cepat tumbuh atau *fast growing*. Tanaman cepat tumbuh cocok digunakan sebagai fitoremediasi logam berat karena memiliki biomassa dan transpirasi tinggi, serta sistem perakaran yang luas (Istiqomah et al., 2017).

O. grandiflorum tumbuh di dataran rendah sampai ke dataran tinggi, 0– 1000 Mdpl, dan yang terbaik pada ketinggian tempat 0– 800 Mdpl. Rata-rata curah hujan yang dibutuhkan yaitu 1500–3000 mm dengan jumlah musim kemarau sampai dengan 3 bulan per tahun. Rata-rata suhu udara yang dikehendaki sekitar antara 22– 29°C, sedangkan suhu maksimum dan minimumnya masing-masing berkisar antara 24–30°C dan 22–28°C. *O. grandiflorum rowlee* ini termasuk spesies yang intoleran dan membutuhkan banyak cahaya untuk pertumbuhannya (Zanzibar, 2017).



Gambar 2. 2 Tanaman Uji *Ochroma grandiflorum rowlee*

2.5.2. *Samanea saman*

Samanea saman merupakan salah satu tanaman alternatif yang bisa digunakan untuk revegetasi lahan bekas TPA serta sering digunakan untuk penghutanan kembali pada lahan-lahan bekas pertambangan. Tanaman ini termasuk pohon yang cepat tumbuh dan menyebar

baik di negara tropis maupun subtropis.

Keunggulan lain dari *S saman* adalah mampu menyerap air di daerah perbukitan dan lereng. *S. saman* menyerap air hujan dan tanaman di bawahnya tumbuh dengan baik. Kemampuan ini sangat berguna dalam mencegah tanah longsor dan banjir. *S. saman* mempunyai sistem perakaran yang besar dan kuat. Hal ini dapat diketahui dengan melihat luas tajuk dan tinggi tanaman. Ukuran dan sebaran akar dipengaruhi oleh tinggi tanaman dan luas kanopi. Pohon dengan akar yang besar dapat memperkuat tanah, mencegah erosi, dan menyimpan air dalam jumlah besar. Lapisan serasah daun disekitarnya menyuburkan tanah dan juga dapat mencegah tanah menjadi tandus. Karena tetesan air hujannya besar, maka jarak tanam menjadi lebih lebar (Mahfuza et al., 2022).



Gambar 2. 3 Tanaman Uji *Samanea saman*

2.6. Mikroorganisme

2.6.1. Arbuscular Mikoriza Fungi

Arbuscular Mikoriza Fungi (AMF) termasuk ke dalam filum Glomeromycota merupakan mikroba tanah yang luas penyebarannya pada akar tanaman. Struktur pembentuk fungi mikoriza arbuskular berupa spora, hifa, vesikel, dan arbuskula. Struktur ini dapat digunakan sebagai sumber inokulum (propagul) untuk menginfeksi akar tanaman (Smith, 2009). Jenis fungi ini mampu bersimbiosis dengan sistem perakaran tanaman serta dapat berasosiasi baik dengan 90% jenis tanaman. Efektifitas simbiosis AMF dengan tanaman inang bergantung pada karakteristik tanaman inang dan faktor abiotik seperti suhu, pH, kelembaban dan mikroorganisme tanah (Finmeta et al., 2018; Proborini et al., 2020). Keberadaan AMF mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi lingkungan tropis dan ketahanan terhadap penyakit. AMF pada sistem perakaran tanaman mampu memproduksi jalinan hifa yang berperan dalam meningkatkan penyerapan unsur hara sehingga lebih tersedia bagi tanaman (Rini et al., 2017). Hifa pada fungi mikoriza arbuskula berkembang dari spora yang

berkecambah dan berfungsi untuk menyerap air serta unsur hara. Struktur arbuskula, yang bentuknya menyerupai pohon, terbentuk dari cabang-cabang hifa yang berada di dalam akar tanaman, tepatnya di antara dinding sel dan membran sel. Struktur ini memiliki peran penting sebagai tempat terjadinya pertukaran nutrisi dan karbon antara fungi mikoriza arbuskula dan tanaman inangnya. Selain itu, arbuskula juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara untuk mineral, nutrisi, dan gula (Muryati et al., 2016). Keberadaan struktur ini memungkinkan tanaman untuk mendapatkan hara yang sulit dijangkau, seperti fosfor, dari tanah dengan lebih efisien. Hal ini sangat penting, terutama dalam kondisi lingkungan yang kurang subur atau minim nutrisi, sehingga fungi mikoriza arbuskula berkontribusi secara signifikan terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

Peran Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) dalam meningkatkan penyerapan unsur hara (terutama fosfor) dan air oleh tanaman, serta memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres abiotik, termasuk kontaminasi logam berat di tanah. Selain itu, AMF juga dapat mengurangi fitotoksisitas logam berat melalui mekanisme seperti pengikatan logam pada jaringan hifa dan meningkatkan pertumbuhan serta biomassa tanaman pada kondisi lingkungan yang tertekan (Rini et al., 2017).

Acaulospora sp. merupakan salah satu genus dari AMF yang terkemuka yang tersebar di ekosistem lahan basah. Berbagai jenis *Acaulospora* sp. tumbuh subur di tanah yang lembap atau tergenang air (Hajoeningtjias et al., 2024). Genus ini memiliki bentuk bulat dan bulat lonjong. Ciri lain dari *Acaulospora* sp. yaitu spora terbentuk pada sisi leher kantong spora, dinding spora 2-3, berwarna (hialin kuning atau kuning kemerahan), dan berukuran 100-400 μm . Keunggulandari genus ini ialah mampu beradaptasi pada kondisi pH tanah <5 hingga netral atau kondisi tanah masam (Miska et al., 2016).

2.6.2. Plant Growth Promoting Rhizobacteria

Plant Growth Promoting Rhizobacteria merupakan bakteri yang hidup di daerah perakaran tanaman. Bakteri ini mampu mengkolonisasi akar dan berperan penting dalam pertumbuhan tanaman (Ashrafuzzaman et al., 2009). Penggunaan PGPR sebagai pupuk hayati merupakan usaha pada bidang bioteknologi untuk meningkatkan produktivitas pertanian. PGPR dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman karena bersifat merangsang pertumbuhan (biostimulan) dengan mensintesis dan mengatur konsentrasi berbagai zat pengatur tumbuh, dapat memfasilitasi tersedianya unsur hara esensial, serta sebagai pengendali patogen tanah (bioprotektan) (Marom et al., 2017).

PGPR adalah kelompok bakteri yang hidup di sekitar akar tanaman dan mampu

meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme. PGPR dapat memfasilitasi toleransi tanaman terhadap stres logam berat dengan cara bioakumulasi dan biosorpsi logam, mengurangi penyerapan logam oleh tanaman, serta memproduksi fitohormon, siderofor, dan asam organik yang mendukung pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Selain itu, PGPR juga dapat memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan ketersediaan nutrisi di sekitar akar tanaman (Adeleke, 2010).

PGPR mampu mengikat N bebas karena adanya enzim nitrogenase yang mereduksi N_2 di udara menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman (Dighe et al., 2010). Tanaman memerlukan kelompok-kelompok PGPR yang mempunyai kemampuan untuk membantu proses pengambilan N bebas agar dapat memenuhi kebutuhan unsur hara N pada tanaman, baik yang bersimbiosis secara langsung dengan tanaman maupun yang non-simbiotik. *Rhizobium* adalah bakteri simbiotik yang mampu menyediakan hara bagi tanaman dengan bersimbiosis dan mengkolonisasi akar tanaman legum. Apabila bersimbiosis dengan tanaman legum, kelompok bakteri ini akan menginfeksi akar tanaman dan membentuk bintil akar. *Rhizobium* hanya dapat memfiksasi N bebas bila berada di dalam bintil akar dari tanaman legum. Peranan *Rhizobium* terhadap pertumbuhan tanaman khususnya berkaitan dengan ketersediaan N bagi tanaman inangnya (Sari dan Prayudyaningsih, 2015). Selain *Rhizobium* terdapat bakteri simbiotik lain yang mampu memfiksasi N yakni *Bradhyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium*, dan *Frankia* (Singh., 2015). PGPR diketahui mampu melarutkan fosfat dengan mekanisme pembentukan khelat dan produksi asam-asam organik seperti asam format, asetat, propionat, laktat, glikolat, fumarat dan suksinat (Widawati dan Muharam, 2010).

2.6.3. Peran Kombinasi AMF dan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*

Interaksi antara Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) dan Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) di dalam rhizosfer tanaman merupakan salah satu aspek penting dalam ekologi tanah yang dapat memengaruhi produktivitas dan kesehatan tanaman, serta dinamika nutrisi di tanah. Secara sinergis, AMF dan PGPR dapat saling mendukung fungsi masing-masing sehingga memberikan manfaat yang lebih besar bagi tanaman dan ekosistem tanah. PGPR, melalui kemampuannya memproduksi hormon pertumbuhan, melarutkan fosfat, dan menekan patogen, dapat menciptakan lingkungan akar yang lebih sehat dan kondusif bagi kolonisasi AMF. Sebaliknya, AMF yang memperluas jangkauan penyerapan akar melalui hifa dan meningkatkan penyerapan nutrisi seperti fosfor, juga dapat menyediakan substrat atau eksudat akar yang mendukung pertumbuhan PGPR. Penelitian Adeleke (2010) menunjukkan

bahwa inokulasi bersama antara AMF dan beberapa strain PGPR, sedapat meningkatkan produksi glomalin di rhizosfer tanaman kacang polong. Glomalin sendiri merupakan protein tanah yang berperan penting dalam pembentukan agregat tanah dan penyimpanan karbon serta nitrogen. Peningkatan produksi glomalin melalui interaksi sinergis ini berpotensi memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon, dan memperkuat ketahanan tanaman terhadap tekanan lingkungan.

Namun, interaksi antara AMF dan PGPR tidak selalu bersifat positif atau sinergis. Kompetisi juga dapat terjadi, terutama dalam kondisi di mana sumber daya seperti ruang, karbon, dan nutrisi terbatas di zona perakaran. Beberapa strain PGPR atau bakteri lain yang berasosiasi dengan spora AMF (*spore-associated bacteria/SAB*) dapat bersaing dengan AMF untuk mendapatkan nutrisi atau bahkan menghambat kolonisasi AMF pada akar tanaman. Adeleke (2010) juga menemukan bahwa tidak semua kombinasi AMF dan PGPR menghasilkan peningkatan signifikan pada pertumbuhan tanaman atau akumulasi karbon dan nitrogen di rhizosfer. Selain itu, terdapat kemungkinan bahwa keberadaan bakteri tertentu pada spora AMF justru tidak memberikan efek positif pada pertumbuhan tanaman, bahkan dapat menurunkan efektivitas simbiosis AMF. Kompetisi ini dapat diperparah oleh kondisi lingkungan yang kurang mendukung, seperti rendahnya ketersediaan nutrisi, pH tanah yang ekstrem, atau adanya senyawa alelopati.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa interaksi antara AMF dan PGPR sangat dipengaruhi oleh spesies atau strain mikroba yang terlibat, jenis tanaman inang, serta kondisi lingkungan tanah. Sinergi antara keduanya dapat dimaksimalkan dengan pemilihan kombinasi mikroba yang tepat dan pengelolaan lingkungan tumbuh yang optimal. Sementara itu, potensi kompetisi harus diantisipasi dengan memahami karakteristik mikroba yang digunakan dan memonitor kondisi tanah secara berkala. Dengan demikian, pemanfaatan interaksi AMF dan PGPR secara bijak dapat memberikan kontribusi nyata bagi pertanian berkelanjutan dan kesehatan ekosistem tanah.

2.7. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu berguna sebagai referensi dan pembandingan dengan penelitian yang akan dilakukan.:

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

Penelitian	Tanaman	Mikroba	Polutan	Pengaruh	Referensi
<i>Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Inoculation on Heavy Metal Accumulation of Maize Grown in a Naturally Contaminated Soil</i>	<i>Zea mays L</i>	<i>Gigaspora margarita ZJ37, Gigaspora decipens ZJ38, Scutellospora gilmori ZJ39, Acaulospora spp., and Glomus spp.</i>	Cu, Zn, Pb, dan Cd	Meningkatkan efisiensi ekstraksi (fitoekstraksi) logam berat dan berpotensi dalam fitoremediasi tanah yang terkontaminasi.	(Wang et al., 2007)
<i>Characterization of Bacteria in the Rhizosphere Soils of Polygonum Pubescens and Their Potential in Promoting Growth and Cd, Pb, Zn Uptake by Brassica napus</i>	<i>Brassica napus</i>	<i>Enterobacter sp., Klebsiella sp.</i>	Cd Pb, and Zn	Improve phytoremediation efficiency Higher dry weights, concentrations and uptakes of Cd, Pb, Zn	(Jing et al., 2014)

Penelitian	Tanaman	Mikroba	Polutan	Pengaruh	Referensi
<i>Influence of plant growth promoting bacteria and its mutant on heavy metal toxicity in Brassica juncea grown in fly ash amended soil</i>	<i>B. juncea</i>	<i>Enterobacter</i> sp.	Ni, Zn and Cr	Meningkatkan biomassa tanaman, protein dan klorofil serta meningkatkan serapan logam berat dengan mekanisme fitoekstraksi.	(Kumar et al., 2008)
<i>Positive interaction of trembesi (Samanea saman) and arbuscular mycorrhizae fungi in Pb stabilization of gold-mine tailing media</i>	<i>Samanea saman</i>	<i>Glomus</i> sp.	Pb	Tanaman mampu bertahan pada media dengan konsentrasi Pb hingga 1,5 mM dengan indeks toleransi sebesar 91,6%. AMF meningkatkan akumulasi Pb dalam jaringan akar secara signifikan, dengan konsentrasi tertinggi tercatat pada akar (526,29 mg/kg).	(Setyaningsih et al., 2024)

Penelitian	Tanaman	Mikroba	Polutan	Pengaruh	Referensi
				Interaksi antara AMF dan <i>S. saman</i> memberikan potensi besar untuk pemulihan tanah tercemar Pb pada daerah tailing.	
Peran Fungi Mikoriza Arbuskula (Fma) dan asam humat terhadap pertumbuhan balsa (<i>Ochroma bicolor Rowlee.</i>) pada tanah terkontaminasi timbal (Pb)	<i>Ochroma bicolor Rowlee</i>	<i>Acaulospora</i> sp.	Pb	Penggunaan tanaman <i>Ochroma grandiflorum rowlee</i> dan AMF dapat menurunkan kandungan Pb di tanah tercemar dengan serapan Pb hingga 2571.17 ppm.	(Istiqomah et al., 2017)

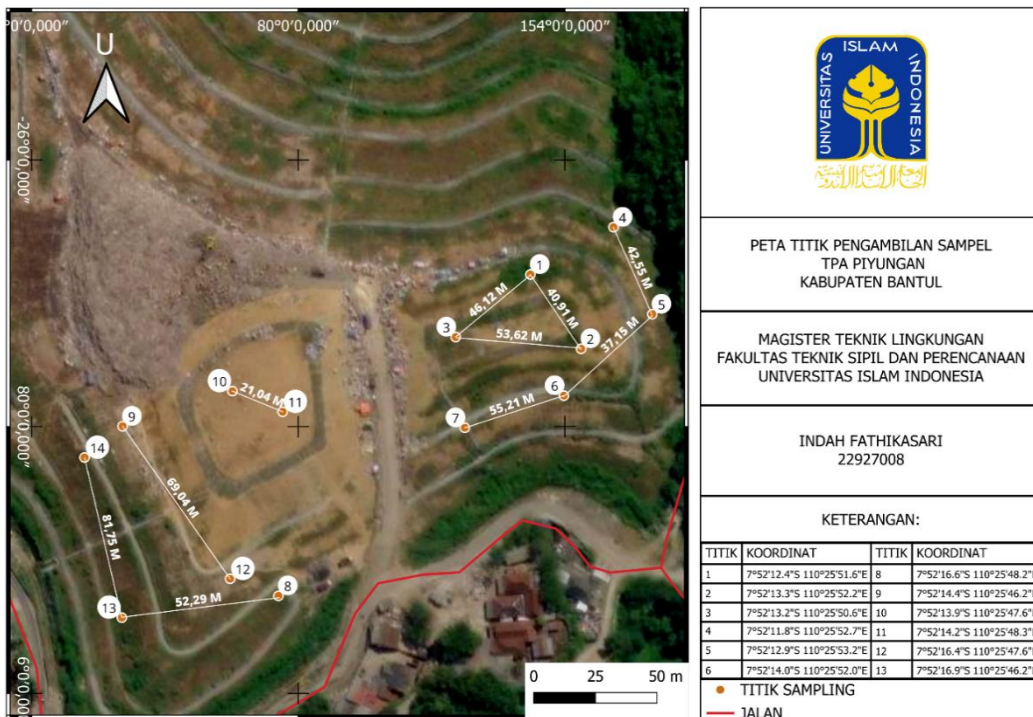
Penelitian	Tanaman	Mikroba	Polutan	Pengaruh	Referensi
<i>Metal biosorption capability of Cupriavidus taiwanensis and its effects on heavy metal removal by nodulated Mimosa pudica.</i>	<i>Mimosa pudica</i>	<i>Cupriavidus taiwanensis</i> TJ208	Hg	Penggunaan tanaman <i>Mimosa pudica</i> dengan bantuan PGPR mampu mengakumulasi logam merkuri hingga 86% lebih tinggi dibandingkan mikroba lain.	(Wulandari et al., 2014)

Berdasarkan penelitian terdahulu tentang tanaman uji *O. grandiflorum* dan *S. saman* serta AMF dan PGPR masih sedikit dilaporkan yang berkaitan dengan penyerapan logam Zn dan ketersediaan c-organik. Pembeda dari penelitian terdahulu ialah Penggunaan tanaman *O. grandiflorum* dan AMF dalam mereduksi Zn di tanah tercemar TPA Piyungan, penggunaan tanaman *O. grandiflorum* dan *S. saman* dengan yang dibantu PGPR untuk mereduksi kandungan Zn di tanah TPA Piyungan.

BAB III METODE

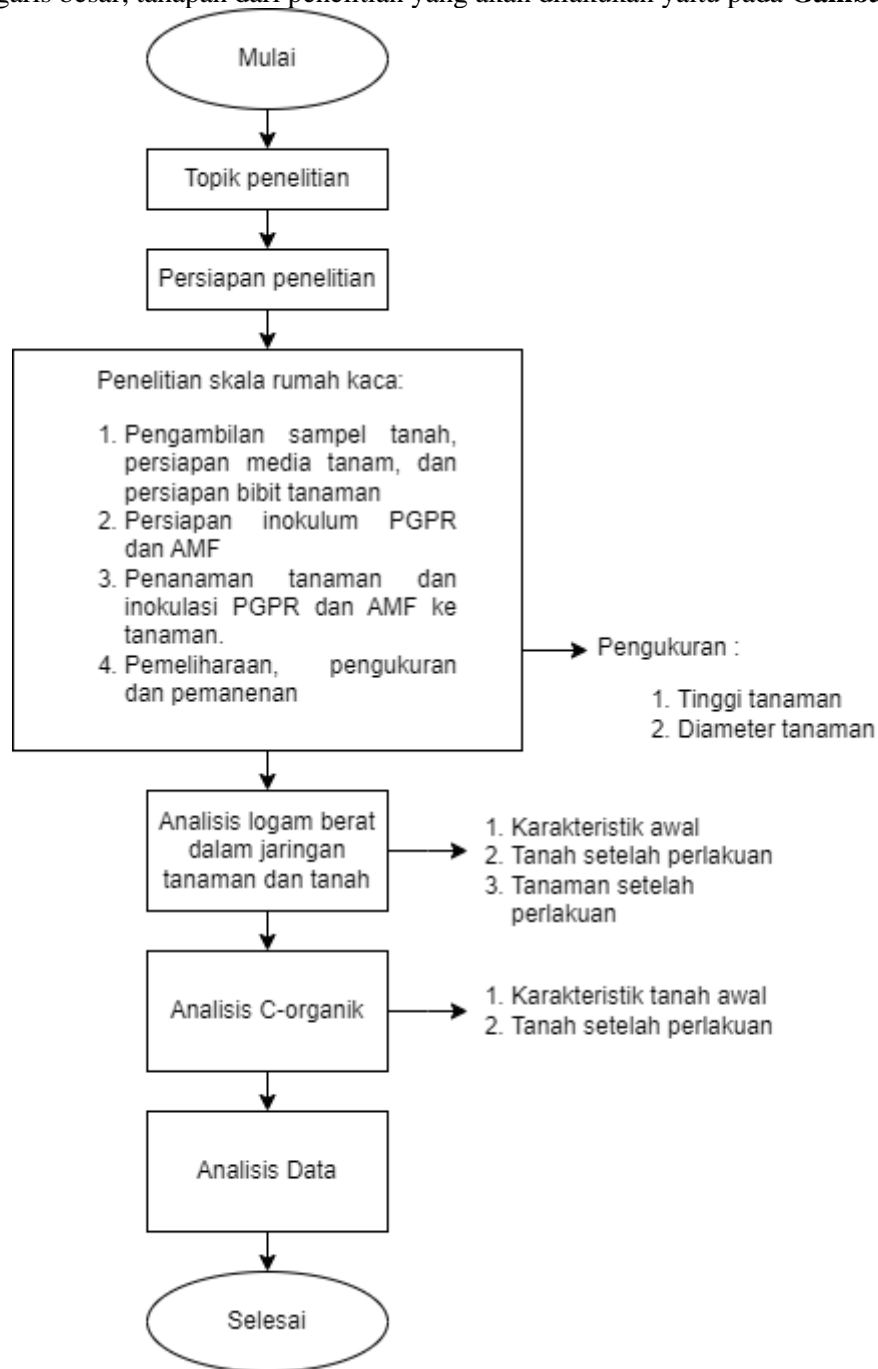
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam skala rumah kaca pada bulan November tahun 2022 hingga Juli 2023. Penelitian dilakukan mulai dari tahapan pengambilan sampel tanah di TPA Piyungan. Persiapan media tanam, penanaman, perawatan tanaman, pengukuran tanaman, pemanenan dilakukan di rumah kaca yang berlokasi di Dusun Wonosalam, Sukoharjo, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Adapun penelitian pertumbuhan bakteri akan dilakukan di Laboratorium Bioteknologi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.



Gambar 3. 1 Lokasi Sampling

Secara garis besar, tahapan dari penelitian yang akan dilakukan yaitu pada **Gambar 3.2**.



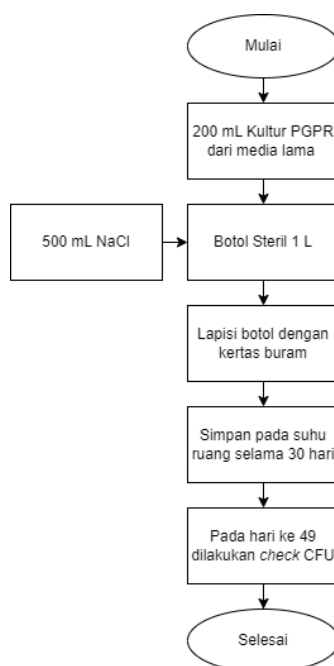
Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian

3.1.1. Pengambilan sampel tanah dan persiapan media tanam

Tanah untuk media tanam diambil dari TPA Piyungan. Tanah diambil dengan menggunakan alat pada kedalaman 10-20 cm dari tanah tutupan TPA dan diambil di beberapa titik lokasi. Kemudian tanah dibawa ke rumah kaca untuk disterilkan selama lima jam pada suhu 85°C. Setelah steril dan dingin, tanah dikomposit dengan tanah dari beberapa titik.

3.1.2. Persiapan inokulum PGPR dan AMF

Tahapan ini dilakukan untuk memperbanyak inokulum PGPR yang akan di inokulasikan ke media tanam. Bakteri PGPR bersumber dari tambang timah (*degraded area*) yang sudah di tinggalkan di daerah Rambak Sungailiat, Bangka Belitung (Wulandari et al., 2023). Terdapat 3 bakteri terseleksi yang dikonsorsium yaitu kode 15 (*selected phosphate solubilizing microbes 1*), kode 16 (*selected phosphate solubilizing microbes 2*), dan terakhir kode R31 (*Enterobacter sp*). Persiapan inokulum mikroorganisme PGPR dilakukan dengan proses *reculture* dari mikroba yang sudah di isolasi ke media yang baru. Subkultur mikroba dilakukan di *laminar air flow* dengan media berupa cairan NaCl 0,9% steril.



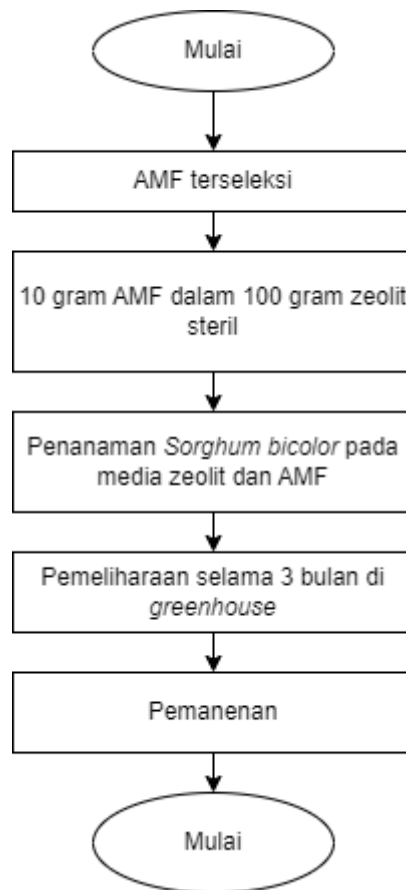
Gambar 3. 3 Tahapan Subkultur

Berdasarkan uji *colony forming unit* (CFU), jumlah *colony* yang ada setiap 1 mL media pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3. 1 Jumlah *colony* PGPR

Kode	Pengenceran	Jumlah <i>colony</i>
PGPR	10 ³	7.104×10 ³ CFU/mL

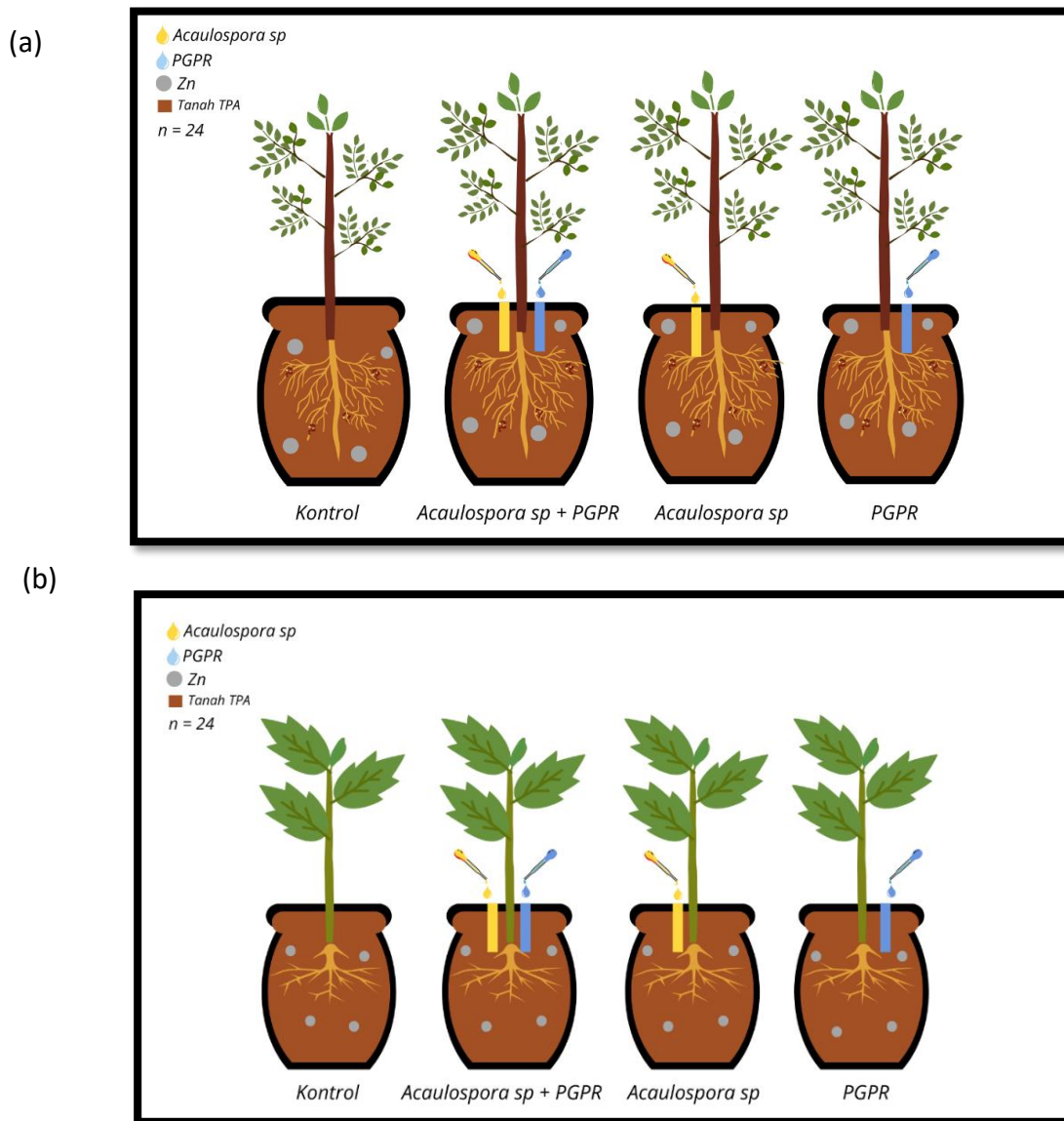
Acaulospora sp. merupakan genus AMF yang digunakan pada penelitian ini. Pada persiapan inokulum AMF dilakukan dengan membuat semai tanaman sorgum dan media tanam zeolit. Tanaman sorgum disemai menggunakan media tanam zeolit dan setelah dua minggu ditambahkan inokulum AMF. Pada tahapan ini semai disiram setiap dua hari sekali, setelah tiga bulan *Sorghum bicolor* dipanen dan media zeolit disimpan dalam plastik *ziplock* agar tidak terkontaminasi (Wulandari et al., 2014).



Gambar 3. 4 Tahap Perbanyakan AMF

3.1.3. Penanaman tanaman dan inokulasi PGPR dan AMF ke tanaman

Tanah yang sudah dipersiapkan selanjutnya dilakukan penanaman semai ke media tanam. Penanaman dilakukan masing-masing *Samanea Saman* dan *Ochroma grandiflorum rowlee* sebanyak 24 tanaman. Banyaknya perulangan pada tanaman berfungsi sebagai pengurangan bias pada pengukuran pertumbuhan tanaman. Perlakuan tanaman antara lain kontrol (kondisi tanah sampel TPA tanpa tambahan mikroorganisme), perlakuan *Acaulospora* sp. + PGPR, perlakuan *Acaulospora* sp., dan perlakuan PGPR. Media tanam untuk tiap polybag sebanyak kurang lebih 750 gram tanah TPA. Jumlah PGPR yang diinokulasikan sebanyak 10 mL dan untuk *Acaulospora* sp. sebanyak 20 gram.



Gambar 3. 5 Desain penelitian tanaman *Samanea saman* (a) dan *Ochroma grandiflorum rowlee* (b)

3.1.4. Pemeliharaan, pengukuran dan pemanenan

Pemeliharaan tanaman dilakukan dengan penyiraman dan pengukuran tanaman. Selama masa pemeliharaan tanaman disiram setiap dua hari sekali dengan 100mL air tiap polybag. Parameter pertumbuhan yang dilakukan yaitu diameter batang (mm), dan ketinggian tanaman (cm). Pengukuran parameter dilakukan setiap tiga minggu sekali selama tiga bulan.

Setelah tiga bulan setelah tanam, tahapan selanjutnya yaitu pemanenan. Tahapan ini pemanenan dilakukan dengan pemisahan antara tanaman dan tanah. Tanaman dibagi menjadi dua bagian antara akar dan batang. Setelah dipisahkan tanaman di timbang berat basah dan berat kering. Untuk berat kering dilakukan perlakuan pengeringan menggunakan oven dengan suhu 70°C selama 36 jam.

3.2. Analisis Data

3.2.1. Analisis Kandungan Zn pada Tanah, Jaringan Akar dan Batang

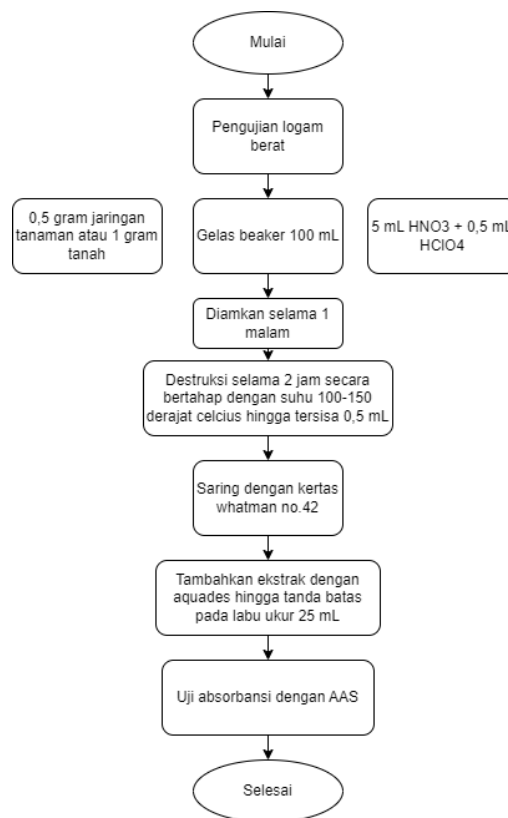
Pengujian logam berat menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer*. Sebelum pengujian kandungan logam berat perlu dilakukan preparasi sampel dengan melarutkan sampel tanah dan jaringan pada larutan HNO_3 dan HClO_4 untuk destruksi dan disaring, sampel akan dimasukkan ke botol vial untuk diuji (Eviati et al., 2023). Setelah dilakukan pengujian sampel, perlu adanya perhitungan besar konsentrasi Zn dengan rumus berikut:

$$\text{Zn (mg/kg)} = \text{ppm kurva} \times \frac{1000 \text{ g}}{(\text{berat sampel g})} \times \frac{\text{ml ekstrak}}{1000 \text{ ml}}$$

Keterangan:

Ppm kurva = kadar contoh yang di dapat dari kurva regresi hubungan antara kadar deret standar dengan pembacanya setelah dikurangi blanko.

1000 = konversi ke kg

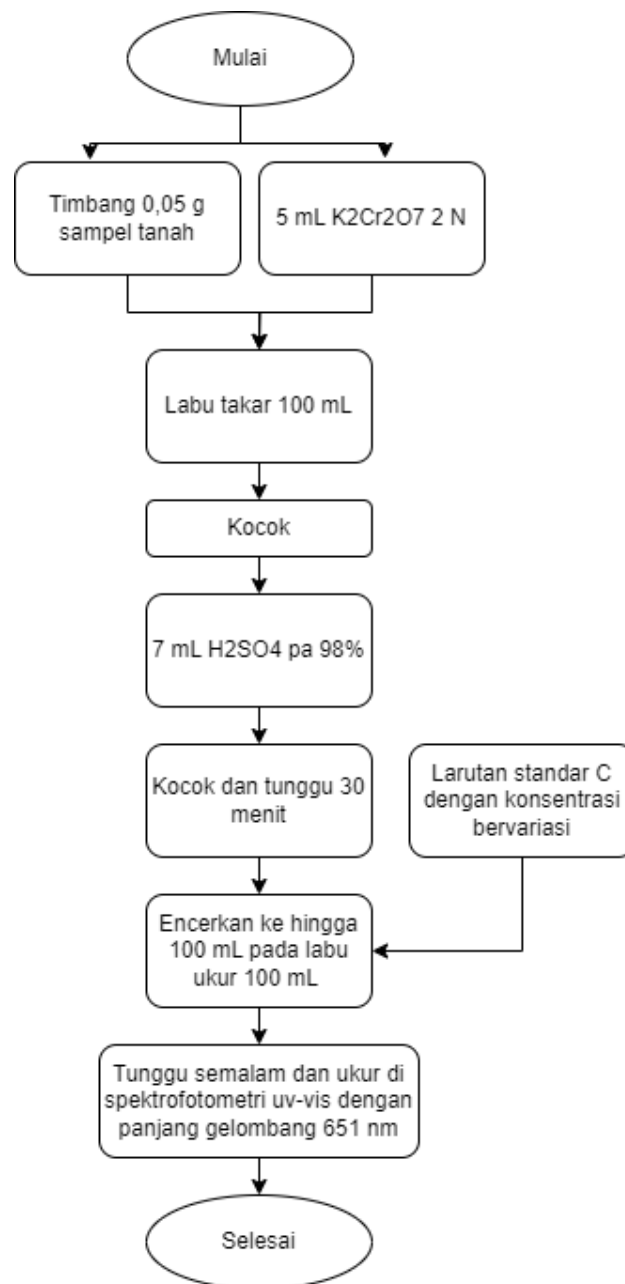


Gambar 3. 6 Tahapan uji logam berat

3.2.2. Analisis kandungan C-organik pada tanah

Kandungan C-organik dalam tanah sangatlah dibutuhkan agar tanah tetap memiliki produktivitas yang baik, Adapun kandungan C-organik yang diperlukan dalam tanah sebesar >2%. Tahapan pengujian C-organik menggunakan metode *Walkley-Black* dilakukan dengan menimbang 0,0500 – 0,1000 g contoh tanah yang telah dihaluskan ke dalam labu takar volume

100 ml. Tambahkan berturut-turut 5 ml larutan $K_2Cr_2O_7$ 2 N, kocok, dan 7 ml H_2SO_4 pa. 98%, kocok lagi, biarkan 30 menit jika perlu sekali-kali dikocok. Untuk standar yang mengandung 250 ppm C, pipet 5 ml larutan standar 5000 ppm C ke dalam labu takar volume 100 ml, tambahkan 5 ml H_2SO_4 dan 7 ml larutan $K_2Cr_2O_7$ 2 N dengan pengerjaan seperti di atas. Kerjakan pula blanko yang digunakan sebagai standar 0 ppm C. Masing-masing diencerkan dengan air bebas ion dan setelah dingin volume ditepatkan hingga tanda tera 100 ml, kocok bolak-balik hingga homogen dan biarkan semalam. Setelah satu malam diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 651 nm (Eviati et al., 2023).



Gambar 3. 7 Pengujian C – Organik

Setelah dilakukan uji kandungan logam berat, perlu dihitung kadar C-organik pada tanah. Berikut rumus c-organik:

$$C (\%) = ppm \text{ kurva} \times \frac{100}{(\text{berat sampel } mg)} \times \frac{ml \text{ ekstrak}}{1000 \text{ ml}}$$

Keterangan:

Ppm kurva = kadar contoh yang di dapat dari kurva regresi hubungan antara kadar deret standar dengan pembacanya setelah dikurangi blanko.

100 = konversi ke %

3.2.3. Karakter serapan logam pada tanaman

a. Faktor transport

Nilai *factor transport* (TF) digunakan untuk mengetahui jumlah logam berat yang ditranslokasikan dari akar ke daun (Durumin et al., 2022).

$$TF = \frac{\text{Konsentrasi logam dalam tajuk tanaman } (\frac{mg}{kg})}{\text{Konsentrasi logam dalam akar tanaman } (\frac{mg}{kg})}$$

Nilai TF memiliki kategori:

TF>1: Mekanisme fitoekstraksi

TF<1: Mekanisme fitostabilisasi

b. Faktor Biokonsentrasi (BCF)

Analisis BCF digunakan untuk mengetahui potensi akumulasi logam oleh tanaman (Durumin et al., 2022).

$$BCF = \frac{\text{Konsentrasi logam dalam akar dan batang tanaman } (\frac{mg}{kg})}{\text{Konsentrasi logam dalam tanah } (\frac{mg}{kg})}$$

Nilai BCF memiliki kategori:

Akumulator: apabila nilai BCF > 1

Excluder: Apabila nilai BCF<1

Indikator: Apabila nilai BCF = 1

c. Efisiensi Penyisihan

Potensi remediasi ditentukan oleh kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat dari tanah. Nilai ini dihitung berdasarkan efektivitas tanaman dalam mengurangi kandungan logam berat dalam media tanah setelah 12 minggu setelah tanam (Juhriah et al., 2023).

$$\text{Efisiensi penyisihan (\%)} = \frac{C_{\text{awal media}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) - C_{\text{akhir media}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}{C_{\text{awal media}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)}$$

3.2.4. Analisis statistik data

Analisis statistik dilakukan menggunakan IBM SPSS Statistics 25 untuk menentukan perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$). ANOVA digunakan untuk menilai perbedaan antar perlakuan, dan uji post-hoc Duncan diterapkan untuk perbandingan pasangan. Hasil dari uji ANOVA menunjukkan apakah ada perbedaan yang signifikan antara perlakuan yang diterapkan, sedangkan uji Duncan memberikan informasi lebih lanjut mengenai perlakuan mana yang secara signifikan berbeda satu sama lain.

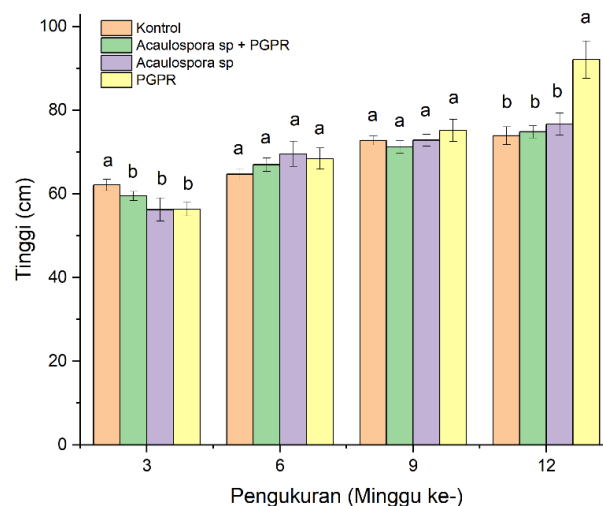
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Parameter Pertumbuhan Tanaman

Parameter pertumbuhan tanaman meliputi parameter fisik dan biomassa. Parameter fisik meliputi tinggi tanaman, diameter batang dan jumlah daun. Sedangkan, biomassa tanaman meliputi berat basah dan kering pada tanaman. Pada pertumbuhan tanaman berat kering lebih sering digunakan sebagai tolak ukur pertumbuhan tanaman hortikultura karena pada berat basah bergantung pada kondisi air (Nurholis et al., 2023). Pengukuran pertumbuhan tanaman dilakukan berkala setiap tiga minggu sekali selama tiga bulan untuk memantau perkembangan tanaman. Parameter yang diukur yaitu tinggi serta diameter tanaman.

4.1.1. Tinggi tanaman *Samanea saman*

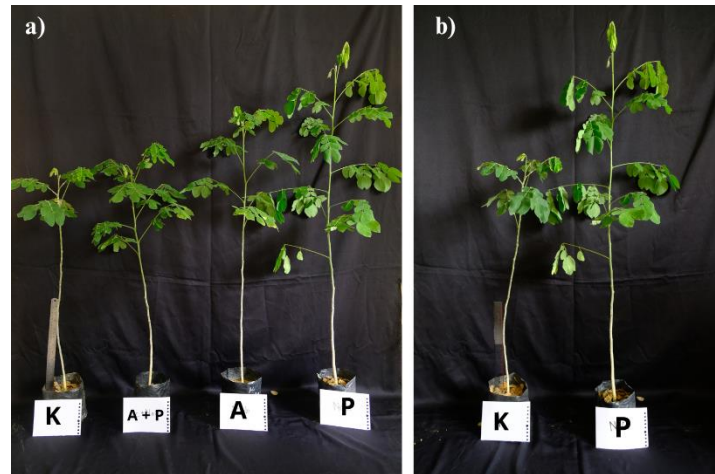
Pertumbuhan tanaman merupakan indikator penting dalam menilai respons tanaman terhadap perlakuan yang diberikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur pengaruh berbagai perlakuan terhadap tinggi tanaman *Samanea saman* (trembesi) yang diamati secara berkala setiap tiga minggu selama dua belas minggu. Parameter tinggi tanaman dipilih sebagai salah satu indikator yang mencerminkan kemampuan tanaman dalam beradaptasi terhadap kondisi lingkungan serta perlakuan yang diberikan. Perlakuan meliputi kontrol (tanpa mikroba), *Acaulospora* sp., PGPR, dan konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR.



Gambar 4.1 Hasil pengukuran tinggi *S. saman* tanaman dua belas minggu setelah tanam. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 24 ulangan, *error bar* menunjukkan standar error, dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

Pada **Gambar 4.1** menunjukkan adanya pertambahan tinggi setiap minggunya. Perbedaan pertumbuhan yang signifikan terjadi di minggu ke-12 menunjukkan rata-rata tinggi

tanaman kontrol, konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR, *Acaulospora* sp., dan PGPR secara berturut-turut 73,90; 74,83; 76,69; dan 92,08 cm. Setiap perlakuan memberikan pengaruh baik pada tinggi tanaman. Hasil analisis sidik ragam (ANOVA) tanaman pada minggu ke-12 nampak adanya perbedaan signifikan ($p < 0,05$) antara kontrol dan PGPR.



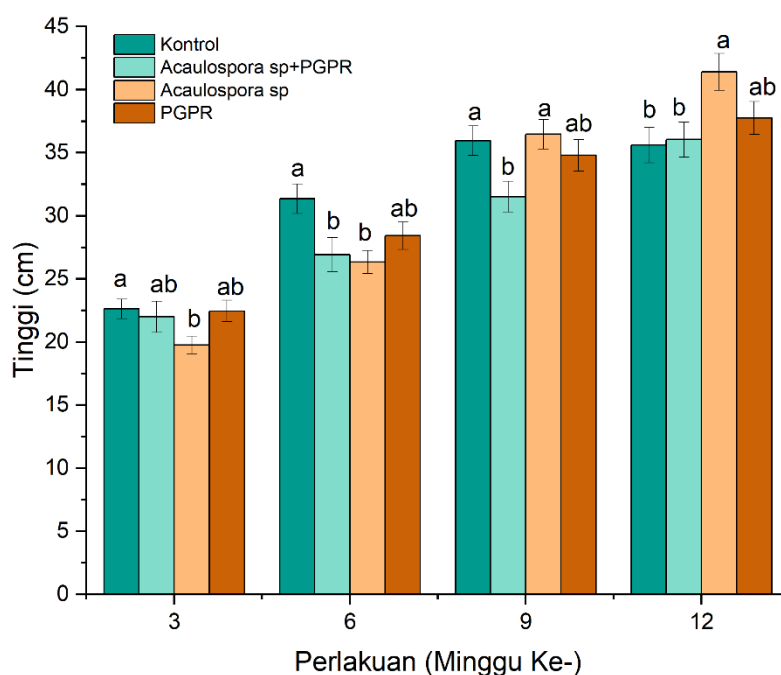
Gambar 4. 2 Tinggi tanaman *S. saman* semua perlakuan (a) dan perlakuan kontrol serta PGPR (b) Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp + PGPR (A+P), *Acaulospora* sp (A), dan PGPR (P).

Jika dibandingkan antara kontrol dan perlakuan PGPR sesuai **Gambar 4.2**. *S. saman*, perlakuan PGPR lebih tinggi. Tanaman *S. saman* membutuhkan nutrisi untuk pertumbuhan optimal. Nutrisi yang dibutuhkan seperti nitrogen, pospor, dan kalium. Mekanisme PGPR dalam pertumbuhan tanaman tidak hanya berkaitan dengan peran PGPR terhadap tumbuhan namun juga pada kondisi fisik, biologis, dan kimia di rizosfer. PGPR berkembangbiak dan meningkatkan populasi mikroba. Selain itu PGPR membantu dalam merangsang tanaman menghasilkan eksudat akar berupa asam amino, gula, asam organik dan senyawa fenolik. Eksudat berfungsi sebagai sumber energi utama bagi mikroba di rizosfer (Marfuah et al., 2008). Saat eksudat melimpah maka lebih banyak mikroba menguntungkan.

PGPR memberi keuntungan bagi fisiologis dan pertumbuhannya dengan menghasilkan fitohormon pemacu tumbuh tanaman. Hormon yang dihasilkan berupa IAA (Indole Acetic Acid), giberilin, dan sitokinin (Karmila et al., 2023). Dari ketiga hormone yang dihasilkan, IAA dan giberilin lebih dominan dalam peningkatan tinggi tanaman. Hormon IAA merupakan hormone yang membantu tumbuhan dalam meningkatkan elongasi sel dan perpanjangan sel di daerah meristem apical yang menyebabkan pertumbuhan tinggi tanaman lebih signifikan (Mawarti et al., 2017). Hormon giberilin membantu merangsang pemanjangan sel di seluruh batang khususnya di ruas batang (Wicaksono et al, 2016).

4.1.2. Tinggi tanaman *Ochroma grandiflorum* rowlee

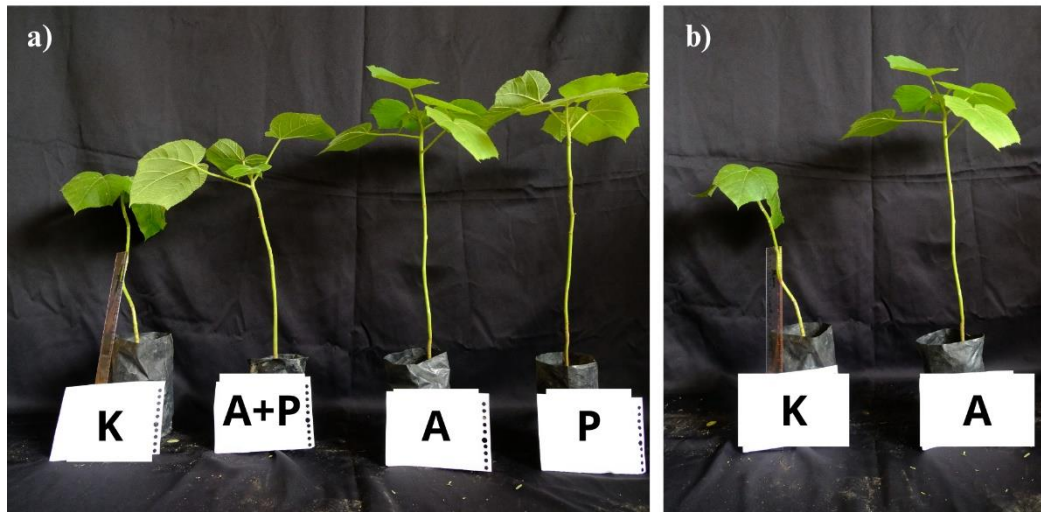
O. grandiflorum tanaman yang menjadi alternatif dalam penelitian biofitoremediasi. Parameter pertumbuhan diukur untuk mengetahui pengaruh dari PGPR, AM, maupun kombinasi keduanya. Hasil sidik ragam (ANOVA) **Gambar 4.3.** menyajikan rerata pengukuran tinggi tanaman setiap tiga minggu sekali selama dua belas minggu. Minggu ke-3 sudah menunjukkan perbedaan tinggi di semua perlakuan, tanaman tanpa perlakuan mikroba paling tinggi begitu juga pada di minggu ke-6. Pada minggu ke-9 tanaman dengan perlakuan *Acaulospora* sp. mengalami peningkatan tinggi yang signifikan daripada perlakuan lainnya. Pada minggu ke-12 perlakuan *Acaulospora* sp. juga memiliki tinggi yang signifikan ($P < 0,5$) daripada perlakuan lainnya. Tinggi tanaman di minggu ke-12 pada perlakuan kontrol, *Acaulospora* sp. + PGPR, *Acaulospora* sp., dan PGPR secara berurutan dalam satuan cm menunjukkan nilai 35,60; 36,04; 41,40; dan 37,75.



Gambar 4.3 Hasil pengukuran tinggi tanaman *O. grandiflorum* dua belas minggu setelah tanam. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 24 ulangan, *error bar* menunjukkan standar error, dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

Apabila perlakuan *Acaulospora* sp. dibandingkan dengan perlakuan kontrol pada **Gambar 4.4 (b)**, perlakuan *Acaulospora* sp. lebih tinggi secara signifikan. Hal ini menunjukkan adanya hubungan menguntungkan dalam mempercepat pertumbuhan antara *Acaulospora* sp. terhadap tanaman *O. grandiflorum*. Hal ini sesuai dengan penelitian Sugiarti dan Taryana (2018) bahwa pemberian *Acaulospora* sp. mampu memberikan pengaruh

terhadap tanaman kopi. Peningkatan tinggi tanaman terjadi karena kondisi perakaran membaik pada *O. grandiflorum*. Dengan membaiknya kondisi perakaran dapat meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara (Wardhika et al., 2015).



Gambar 4. 4 Tinggi tanaman *O. grandiflorum* semua perlakuan (a) dan perbandingan tinggi kontrol serta Acaulospora sp (b). Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium Acaulospora sp + PGPR (A+P), Acaulospora sp (A), dan PGPR (P).

4.1.3. Perbandingan Tinggi Dua tanaman

Perbandingan tinggi antara dua tanaman ditunjukkan pada **Tabel 4.1**. Berdasarkan hasil analisis, perlakuan dengan tanaman *S. saman* lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman *O. grandiflorum*. Hal ini terjadi karena tanaman *S. saman* yang memiliki kemampuan adaptasi dalam berbagai kondisi dan termasuk tanaman cepat tumbuh (Setyaningsih et al., 2024). Tanaman *Samanea saman* memiliki system perakaran yang lebih berkembang dan memungkinkan untuk menjangkau sumber air dan nutrisi lebih efektif dibandingkan dengan tanaman *O. grandiflorum*. Penggunaan mikroorganisme, *S. saman* dengan PGPR lebih unggul karena *Enterobacter* sp. dan *Phosphate Solubilizing Bacteria* (PSB) membantu tanaman dalam peningkatan tinggi. Penelitian oleh Maharani et al. (2017) menunjukkan bahwa penggunaan *Enterobacter* sp. dapat meningkatkan tinggi tanaman kentang. Selain itu, *Enterobacter* sp. berperan membentuk nodul akar melalui symbiosis obligat dengan tanaman legum *S. saman* (Sapalina et al., 2022a). Proses ini diawali dengan sekresi flavonoid oleh akar yang menarik bakteri, diikuti pembentukan struktur infeksi dan diferensiasi sel inang untuk menciptakan lingkungan anaerobik optimal bagi nitrogenase (Dinas Pertanian, 2024). Mekanisme ini memungkinkan *S. saman* memenuhi 70-80% kebutuhan nitrogen tanpa ketergantungan pada pupuk anorganik (Flynn dan Idowu, 2015). Dengan terpenuhinya nitrogen yang cukup tinggi pada tanaman, memberikan manfaat untuk tanaman lebih tinggi dalam proses pertumbuhannya

(Lutfiah et al., 2021). Selain itu peran dari bakteri pelarut phosphate pada PGPR juga berpengaruh dalam tinggi tanaman (Arlina et al., 2024). Pada tanaman kedelai bakteri pelarut phosphate ini meningkatkan tinggi 1,48 cm daripada perlakuan tanpa bakteri (Umar et al., 2024).

Meskipun PGPR meningkatkan tingkat tinggi *S. saman* melalui sinergi *Enterobacter* sp. dan bakteri pelarut fosfat dengan sistem perakaran yang sudah adaptif, metode ini tidak efektif untuk *O. grandiflorum*, karena respons tinggi tanaman yang berbeda terhadap aplikasi PGPR. *O. grandiflorum* menunjukkan reaksi yang lebih baik terhadap inokulasi *Acaulospora* sp., dengan sekresi asam glukonat (pH 4,2–4,7), *Acaulospora* sp. meningkatkan efisiensi penyerapan P di zona rizosfer (Rini et al., 2021). Fenomena ini mendukung teori simbiosis bahwa tanaman legum seperti *S. saman* menggunakan bakteri PGPR untuk mengoptimalkan fiksasi nitrogen (Sapalina et al., 2022), sedangkan tanaman non-legum seperti *O. grandiflorum* bergantung pada mikoriza untuk mendapatkan fosfor (Noppakat et al., 2022). Berdasarkan dari hasil dan pembahasan pada penelitian ini perlakuan dengan kombinasi antara *Acaulospora* sp. dan PGPR tidak berdampak baik pada pertambahan tinggi tanaman. Namun, apabila *Acaulospora* sp. dan PGPR diaplikasikan secara individu dapat meningkatkan tinggi tanaman.

Tabel 4. 1 Perbandingan tinggi tanaman *S. saman* dan *O. grandiflorum*

Perlakuan		Tinggi (cm)			
		Minggu Ke-3	Minggu Ke-6	Minggu Ke-9	Minggu Ke-12
<i>Samanea Saman</i>	K	62,15 ^a ± 1,37	64,69 ^a ± 1,31	72,77 ^a ± 1,59	73,9 ^b ± 2,13
	A+P	59,48 ^b ± 1,09	66,96 ^a ± 1,59	71,21 ^a ± 1,42	74,83 ^b ± 1,51
	A	56,23 ^b ± 2,78	69,54 ^a ± 3,01	72,81 ^a ± 2,66	76,69 ^b ± 2,64
	P	56,33 ^b ± 1,63	68,42 ^a ± 2,53	75,17 ^a ± 3,09	92,08 ^a ± 4,45
<i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	K	22,63 ^a ± 0,77	31,36 ^a ± 1,18	35,96 ^a ± 1,16	35,6 ^b ± 1,40
	A+P	22,00 ^{ab} ± 1,24	26,92 ^b ± 1,35	31,52 ^b ± 1,21	36,04 ^b ± 1,40
	A	19,75 ^b ± 0,72	26,33 ^b ± 0,92	36,46 ^a ± 1,17	41,4 ^a ± 1,46
	P	22,46 ^{ab} ± 0,85	28,42 ^{ab} ± 1,09	34,79 ^{ab} ± 1,24	37,75 ^{ab} ± 1,30

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan. Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR (A+P).

4.1.4. Diameter tanaman *Samanea saman*

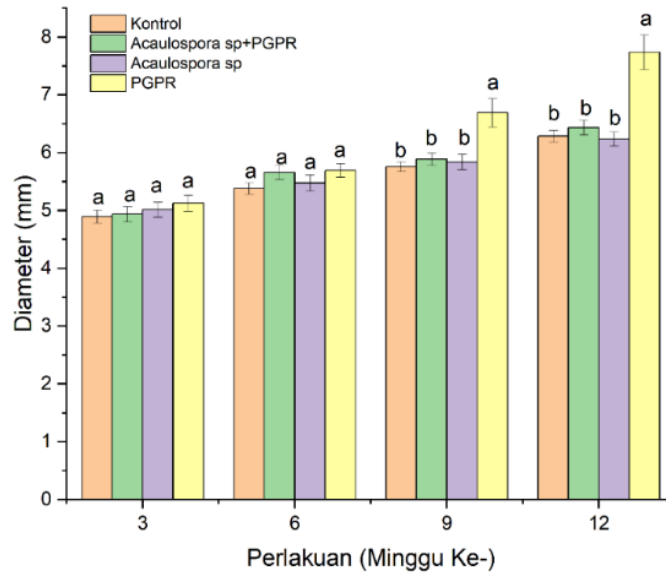
Diameter batang menjadi parameter kedua dalam mengukur pertumbuhan tanaman *S. saman*. Pengamatan pertumbuhan diameter memberikan gambaran adanya penebalan batang karena penyerapan nutrisi dan akumulasi biomassa. Berdasarkan pengukuran diameter selama

tiga bulan, yang dilakukan setiap tiga minggu sekali mengalami perbesaran diameter. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman mengalami pertumbuhan yang baik.

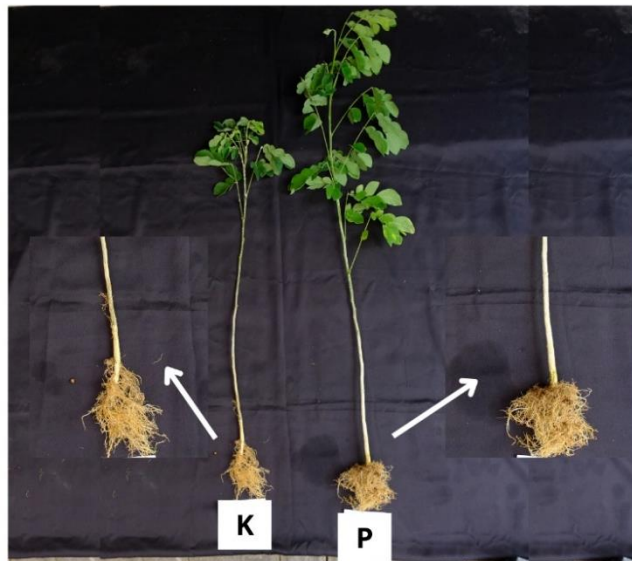
Hasil sidik ragam (*ANOVA*) **Gambar 4.5.** menunjukkan perubahan diameter tanaman selama dua belas minggu setelah tanam. Pada minggu ke-3 dan ke-6 tidak terdapat perbedaan signifikan, namun terdapat perubahan lebih besar diameter pada perlakuan PGPR dibanding perlakuan lainnya. Minggu ke-9 dan ke-12 perlakuan PGPR terdapat perbedaan signifikan ($P < 0,5$) dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Diameter batang tanaman *S. saman* minggu ke-12 pada perlakuan kontrol, *Acaulospora* sp. + PGPR, *Acaulospora* sp., dan PGPR secara berurutan dalam satuan mm sebesar 6,28; 6,43; 6,23; dan 7,73.

Pada **Gambar 4.6.** menunjukkan adanya perbedaan besar diameter antara perlakuan kontrol (K) dan PGPR (P). Diameter tanaman dengan perlakuan PGPR lebih besar dibandingkan dengan kontrol. PGPR meningkatkan pertumbuhan vegetative termasuk penambahan diameter batang. Sama halnya dengan parameter tinggi tanaman, PGPR membantu dalam memproduksi fitohormon berupa IAA (Indole Acetic Acid), giberilin, dan sitokinin (Karmila et al., 2023).

Hormon sitokinin berperan penting pada peningkatan diameter tanaman, akan tetapi hormon ini harus saling bekerjasama dengan hormon IAA dan giberilin. Hormon sitokinin merangsang aktivitas kambium dengan melakukan pembelahan sel jaringan dengan pembentukan jaringan sekunder seperti xylem (pengangkut air dan mineral) dan floem (pengangkut hasil fotosintesis). Aktivitas kambium ini secara langsung berkontribusi pada penebalan batang sehingga terjadi peningkatan diameter batang yang signifikan (Rosniawaty et al., 2018). Hormon sitokinin mencegah penuaan pada sel-sel kambium, sehingga aktivitas pembelahan sel dapat berlangsung lebih lama. Ini mendukung pembentukan jaringan baru secara terus-menerus, yang menambah diameter batang (Ernita et al., 2023).



Gambar 4.5 Hasil pengukuran diameter tanaman *S. saman* dua belas minggu setelah tanam. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 24 ulangan, *error bar* menunjukkan standar error, dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.



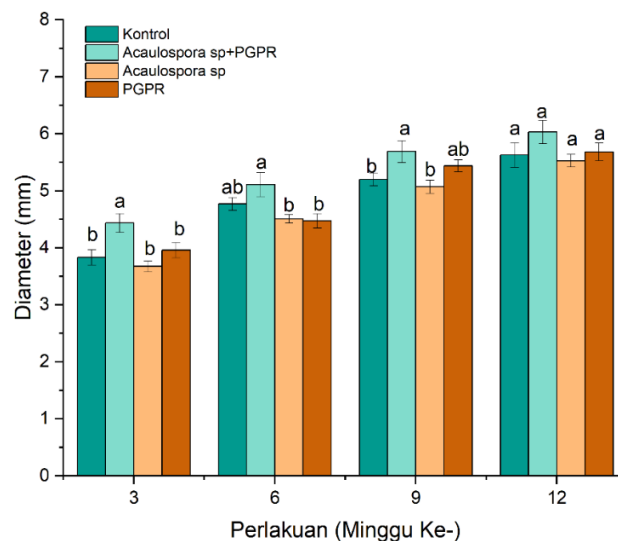
Gambar 4.6 Diameter batang *S. saman* pada perlakuan Kontrol (K) dan PGPR (P)

4.1.5. Diameter tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee*

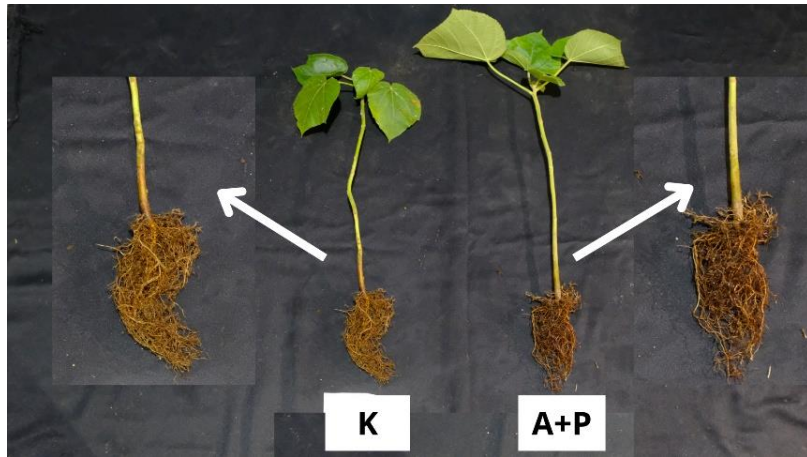
Diameter tanaman *O. grandiflorum* mengalami peningkatan pada setiap pengukuran. Berdasarkan hasil sidik ragam rerata pertambahan diameter tanaman pada tiap perlakuan berbeda **Gambar 4.7**. Pada minggu ke-3 perlakuan *Acaulospora* sp. + PGPR terjadi perubahan signifikan ($P < 0,05$) daripada perlakuan lainnya. Begitu juga dengan minggu ke-6 dan ke-9, potensi diameter paling besar pada perlakuan *Acaulospora* sp. + PGPR. Perubahan diameter yang signifikan pada minggu ketiga hingga keenam setelah perlakuan dengan

Acaulospora sp. + PGPR dapat disebabkan oleh respons awal tanaman terhadap inokulasi. Pada fase ini, interaksi antara *Acaulospora* sp. dan PGPR, menghasilkan keuntungan bagi tanaman. PGPR yang tersebar luas pada rizosfer membantu mendorong pertumbuhan tanaman melalui mekanisme fiksasi nitrogen, pelarutan nutrisi, dan sintesis hormon untuk penambahan diameter tanaman (Diagne et al., 2020; Zhang et al., 2024). Pada minggu ke-12 tidak ada perbedaan yang signifikan ($P>0,05$). Namun, pada minggu ke-12, diameter dengan perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR tetap memiliki ukuran terbesar dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Jika dibandingkan dengan perlakuan kontrol pada **Gambar 4.8.**, perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR lebih besar.

Apabila dibandingkan dengan parameter tinggi, *O. grandiflorum* dengan *Acaulospora* sp. menunjukkan perlakuan yang baik. Namun, pada parameter diameter batang menunjukkan perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR lebih baik dalam memperbesar diameter batang. Perbedaan ini terjadi karena adanya kompetisi antara mikroba yang seharusnya kombinasi antara kedua mikroba dapat berdampak lebih baik pada tanaman. Kompetisi yang terjadi berupa kompetisi pemenuhan kebutuhan hasil fotosintesis oleh mikoriza dan bakteri. Sehingga, hasil fotosintesis dari tanaman berkurang karena alokasi energi. Hal ini berdampak kepada pemanjangan sel apical tanaman tidak dapat maksimal, tetapi mendukung sintesis dinding sel sekunder untuk penebalan batang (Sukarno et al., 2023).



Gambar 4. 7 Hasil pengukuran diameter tanaman *O. grandiflorum* dua belas minggu setelah tanam. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 24 ulangan, *error bar* menunjukkan standar error, dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.



Gambar 4. 8 Perbandingan diameter tanaman *O. grandiflorum* Perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR (A+P)

4.1.6. Perbandingan diameter dua tanaman

Berdasarkan hasil pengamatan, perbandingan diameter batang dua tanaman ditunjukkan pada **Tabel 4.2**. Tanaman *Samanea saman* dengan perlakuan PGPR memiliki diameter batang 7,74 mm lebih besar dibandingkan dengan tanaman *O. grandiflorum* ditambah kombinasi *Acaulospora* sp. + PGPR, yaitu sebesar 6,03 mm. Perbedaan diameter batang yang lebih besar pada *S. saman* dibandingkan *O. grandiflorum* secara umum dapat dijelaskan oleh faktor fisiologis dan genetik antar spesies. *S. saman*, sebagai tanaman leguminosa, memiliki kemampuan fiksasi nitrogen melalui simbiosis dengan *Rhizobium* dalam bintil akarnya, di sisi lain penambahan *Enterobacter* sp. dalam PGPR membantu meningkatkan kondisi tanah yang miskin nitrogen atau saat simbiosis dengan *Rhizobium* kurang optimal (Sapalina et al., 2022b). Adanya tambahan PGPR membantu ketersediaan nitrogen untuk tanaman, sehingga terjadi penambahan nitrogen yang sangat penting untuk diameter tanaman (Montenegro et al., 2019). Selain itu, *S. saman* memiliki kecepatan tumbuh yang relatif lebih tinggi dan adaptasi yang lebih baik terhadap perlakuan PGPR, sehingga mampu menunjukkan respons pertumbuhan diameter yang lebih besar dibandingkan dengan *O. grandiflorum*. Berdasarkan data perbandingan diameter tanaman menunjukkan bahwa perlakuan tanaman *S. saman* dengan PGPR mampu memperbesar diameter batang. Sedangkan, perlakuan tanaman *O. grandiflorum* menunjukkan adanya kombinasi *Acaulospora* sp. dan PGPR mampu memperbesar diameter batang.

Tabel 4. 2 Perbandingan diameter tanaman *S. saman* dan *O. grandiflorum*

Perlakuan		Diameter (mm)			
		Minggu Ke-3	Minggu Ke-6	Minggu Ke-9	Minggu Ke-12
<i>Samanea Saman</i>	K	3,83 ^a ± 0,11	5,3 ^a ± 0,10	5,76 ^b ± 0,08	6,29 ^b ± 0,10
	A+P	4,44 ^a ± 0,13	5,6 ^a ± 0,12	5,89 ^b ± 0,11	6,43 ^b ± 0,13
	A	3,67 ^a ± 0,13	5,48 ^a ± 0,14	5,84 ^b ± 0,13	6,23 ^b ± 0,12
	P	3,96 ^a ± 0,14	5,69 ^a ± 0,12	6,69 ^a ± 0,24	7,74 ^a ± 0,30
<i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	K	4,89 ^b ± 0,13	4,77 ^{ab} ± 0,11	5,2 ^b ± 0,11	5,63 ^a ± 0,21
	A+P	4,93 ^a ± 0,16	5,11 ^a ± 0,21	5,69 ^a ± 0,19	6,03 ^a ± 0,20
	A	5,01 ^b ± 0,10	4,51 ^b ± 0,08	5,07 ^b ± 0,12	5,53 ^a ± 0,11
	P	5,13 ^b ± 0,14	4,47 ^b ± 0,12	5,44 ^{ab} ± 0,11	5,68 ^a ± 0,16

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan. Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR (A+P).

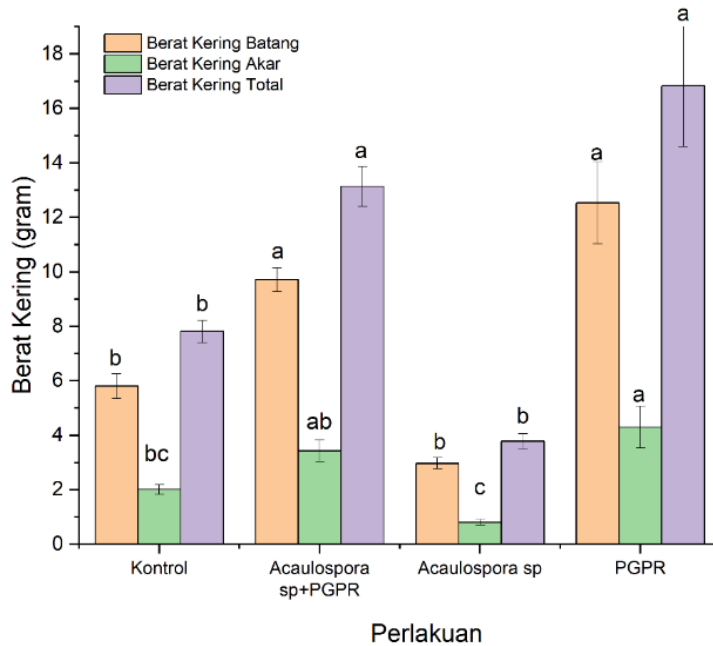
4.2. Biomassa tanaman pada jaringan tanaman

Berat kering merupakan salah satu parameter yang diukur. Berat kering menunjukkan adanya akumulasi status nutrisi pada tanaman. Berat kering juga menjadi indikator yang menentukan baik atau tidaknya pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Nilai berat kering didapatkan dari proses pengeringan tanaman segar yang dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 70°C selama 48 jam. Hasil analisis dua tanaman disajikan berikut ini:

4.2.1. Berat kering tanaman *Samanea Saman*

Pada **Gambar 4.9**, tanaman *Samanea saman* dapat dilihat bahwa rerata berat kering terdapat pada perlakuan PGPR dengan berat kering batang 12,53 gram, berat kering akar 4,30 gram, dan berat total 16,84 gram. Untuk melihat pengaruh dari perlakuan dilakukan sidik ragam (*Anova*) dan uji Duncan, berdasarkan **Gambar 4.9**, perlakuan PGPR berpengaruh nyata dibandingkan dengan perlakuan kontrol. Hal ini sejalan dengan penelitian Junianti *et al* (2020), pemberian PGPR mampu meningkatkan bobot kering akar padi hingga 149%.

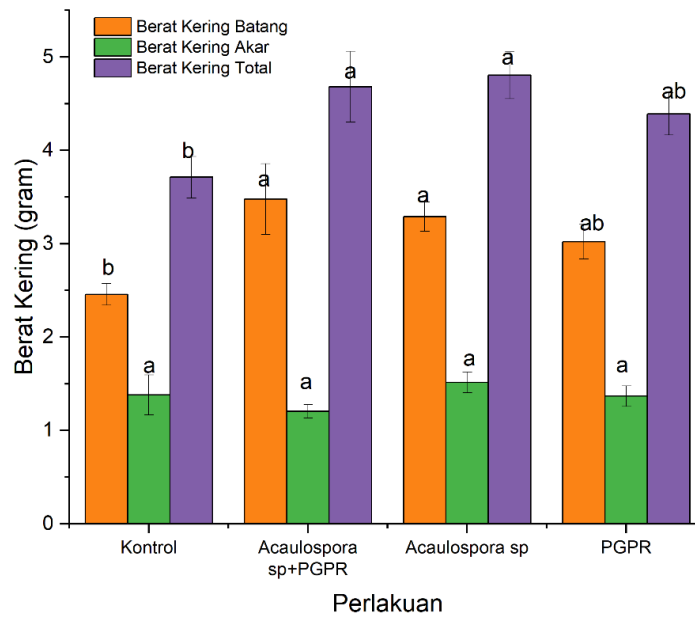
PGPR memiliki dampak positif untuk tanaman dengan kemampuan mensintesis asam amino yang dihasilkan oleh eksudat akar berupa *L-tytophan* yang merupakan prekursor dari hormon IAA, sehingga serapan hara ke tanaman semakin meningkat. Penggunaan PGPR diduga dapat memacu pertumbuhan tanaman dengan bantuan hormon IAA yang menyebabkan pertumbuhan rambut akar (Junianti *et al.*, 2020; Permadi dan Triono, 2019).



Gambar 4.9 Perbandingan berat kering antara batang, akar, dan total tanaman *S. saman*. Hasil pengukuran berat kering tanaman. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 5 ulangan, *error bar* menunjukkan standar eror, dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

4.2.2. Berat kering tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee*

Pengaruh perlakuan PGPR dan AMF pada berat kering juga diamati pada tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee*. Hasil pengamatan menunjukkan tiap perlakuan memiliki dampak positif pada tanaman. Dari semua perlakuan berdasarkan hasil sidik ragam (*Anova*) dan uji Duncan **Gambar 4.10**, menunjukkan bahwa perlakuan *Acaulospora sp.* yang memiliki berat kering total paling tinggi. Berat kering pada batang, berat kering akar, dan berat kering total tanaman *O. grandiflorum* perlakuan *Acaulospora sp.* secara berurutan yaitu 3,29 gram; 1,52 gram; dan 4,80 gram.



Gambar 4. 10 Perbandingan berat kering antara batang, akar, dan total *O. grandiflorum*. Hasil pengukuran berat kering tanaman. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 5 ulangan, *error bar* menunjukkan standar eror, dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

Inokulasi *Acaulospora* sp. meningkatkan penyerapan unsur hara oleh akar tanaman (Xie et al., 2014). Hal tersebut selanjutnya akan mempengaruhi proses pembentukan dan perkembangan organ tanaman (batang dan akar). Proses tersebut berhubungan dengan perkembangan sel tanaman berupa selulosa dan penebalan dinding sel membesar. Hal ini selanjutnya akan berpengaruh pada berat kering tanaman.

4.2.3. Perbandingan berat kering dua tanaman

Perbandingan antara kedua berat kering tanaman ditunjukkan pada **Tabel 4.3.** terdapat berat kering batang, akar, dan total. Tanaman *S. saman* dengan PGPR mampu menjadi tanaman terberat dibandingkan dengan tanaman *O. grandiflorum*. Hal ini sebanding dengan tinggi tanaman *S. saman* dan diameternya.

Pada tanaman *O. grandiflorum* perlakuan dengan *Acaulospora* sp. menunjukkan berat kering paling berat hanya pada bagian akarnya dan total berat kering. Pada perlakuan kombinasi *Acaulospora* sp. menunjukkan berat kering paling berat pada bagian batang. Hal ini menunjukkan keunggulan dari *Acaulospora* sp. dalam pengaplikasian secara individu, mekanisme yang dilakukan oleh *Acaulospora* sp. melalui peningkatan berat akar dengan ekspansi jaringan hifa untuk penyerapan unsur hara (Tanwar et al., 2013). Untuk pengaplikasian kombinasi mikroba, tanaman akan membagikan sumber karbon hasil fotosintat ke dua mikroba dan menimbulkan adanya kompetisi antara keduanya. Meskipun

kombinasi kedua mikroba dapat menambah berat kering batang namun, terdapat penurunan biomassa akar (Tanwar et al., 2013).

Tabel 4. 3 Perbandingan berat kering tanaman *S. saman* dan *O. grandiflorum*

Perlakuan		Berat Kering (gram)		
		Berat Batang	Berat Akar	Berat Total
<i>Samanea Saman</i>	K	5,81 ^b ± 0,46	2,01 ^{bc} ± 0,19	7,82 ^b ± 0,41
	A+P	9,71 ^a ± 0,44	3,43 ^{ab} ± 0,40	13,14 ^a ± 0,73
	A	2,97 ^b ± 0,21	0,81 ^c ± 0,10	3,77 ^b ± 0,28
	P	12,53 ^a ± 0,15	4,30 ^a ± 0,77	16,83 ^a ± 2,23
<i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	K	2,46 ^b ± 0,12	1,38 ^a ± 0,21	3,71 ^b ± 0,22
	A+P	3,48 ^a ± 0,38	1,20 ^a ± 0,07	4,68 ^a ± 0,38
	A	3,29 ^a ± 0,16	1,52 ^a ± 0,11	4,81 ^a ± 0,25
	P	3,02 ^{ab} ± 0,19	1,37 ^a ± 0,11	4,39 ^{ab} ± 0,23

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan. Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR (A+P).

4.3. Serapan Zn pada jaringan tanaman pasca bio-fitoremediasi

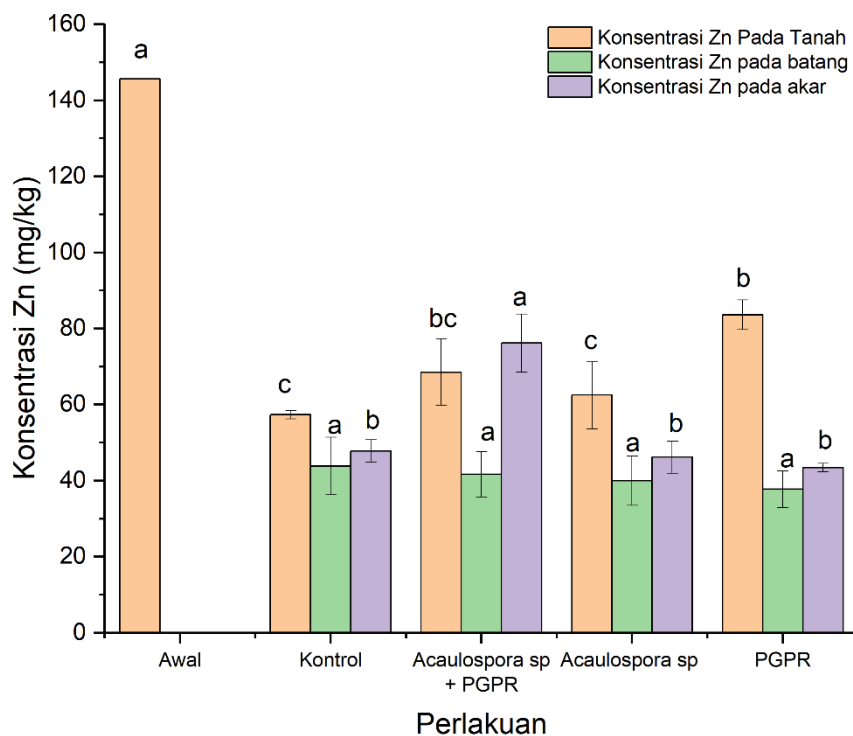
Timbunan sampah di TPA piyungan berpotensi meningkatkan kandungan logam berat pada tanah. Meningkatnya logam berat dapat menjadi ancaman bagi Kesehatan manusia dan apabila terakumulasi dalam rantai makanan perlu adanya tindakan untuk mengurangi risiko (Elango et al., 2022). Sinergi antara tanaman dan mikroorganisme dapat membangun strategi pengurangan risiko logam berat yang beriringan dengan perbaikan lahan. Berikut ini potensi mikroorganisme dan tanaman dalam mengakumulasi logam berat Zn:

4.3.1 Serapan Zn oleh jaringan *Samanea saman*

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman *Samanea saman* mengakumulasi logam berat Zn yang bersumber dari tanah tercemar pada lahan TPA Piyungan. Tanaman dengan perlakuan tanpa mikroba (kontrol), logam berat Zn yang terakumulasi di akar sebesar 47,82 mg/kg dan batang 43,65 mg/kg. Tanaman dengan perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR mengakumulasi sebesar 76,18 mg/kg di akar dan 43,83 mg/kg di batang. Tanaman dengan perlakuan *Acaulospora* sp. di akar terakumulasi sebesar 46,18 mg/kg dan pada batang sebesar 41,65 mg/kg. Pada tanaman dengan perlakuan PGPR mampu mengakumulasi 43,43 mg/kg pada akar dan 37,75 mg/kg di batang.

Akumulasi logam berat Zn sebagian besar terakumulasi pada bagian akar tanaman. Berdasarkan pada **Gambar 4.11**, tanaman dengan perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR yang memiliki nilai akumulasi tertinggi pada bagian akar tanaman. Hal ini sejalan dengan

penelitian Setyaningsih *et al* (2024), tanaman *S. saman* yang bekerjasama dengan mikroorganisme mengakumulasi logam berat Pb tertinggi pada bagian akar hingga 10 kali lipat dibandingkan dengan batang. Kemampuan jaringan tanaman dalam mengakumulasi logam berat bergantung pada fisiologi, sifat anatomi, dan struktur jaringan tanaman sebagai akumulator. Terdapat kecenderungan organ tanaman dalam menyimpan logam berat di dalam jaringannya dengan konsentrasi yang berbeda-beda yaitu akar lebih besar daripada batang. Akar tanaman dapat menyediakan permukaan yang lebih besar untuk menyerap dan menyimpan kontaminan logam berat (Hamim *et al.*, 2018).



Gambar 4. 11 Perbandingan serapan Zn pada jaringan batang dan jaringan akar tanaman *S. saman*. Hasil pengukuran berat kering tanaman. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 3 ulangan dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

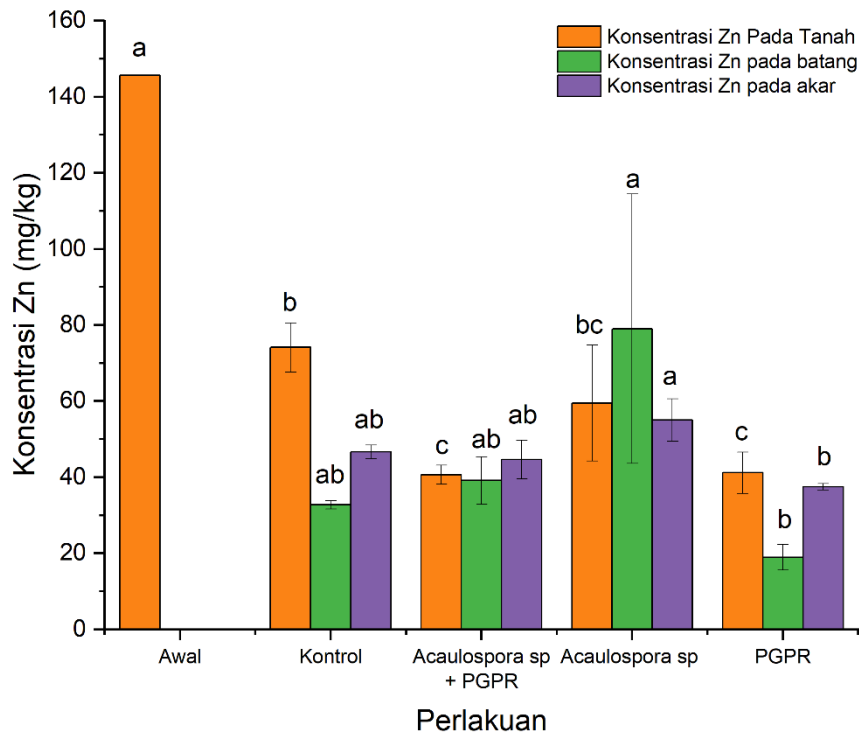
Akumulasi di batang tanaman tidak terlepas dari kerjasama antara tanaman dan mikroorganisme. Pada Hnini *et al* (2024) saat *Acaulospora* sp. dan PGPR diaplikasikan secara bersamaan, terjadi interaksi sinergis yang lebih efektif. *Acaulospora* sp. memperluas zona penyerapan akar, sementara PGPR merangsang penyerapan dan translokasi. Bersamaan dengan itu, PGPR mengurangi mobilitas dan ketersediaan logam berat pada rizosfer, sehingga mendukung mekanisme fitostabilisasi. Secara tidak langsung, mikroorganisme membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap logam berat dan mendorong produksi biomassa yang lebih tinggi, yang berkontribusi baik pada penyerapan maupun stabilisasi kontaminan.

Hubungan kompleks antara tanaman, mikroorganisme, dan logam ini menunjukkan potensi besar penggunaan mikroorganisme dalam meningkatkan efektivitas fitoremediasi tanah yang terkontaminasi logam berat (Widyawati, 2011). Kombinasi ini tidak hanya meningkatkan penyerapan Zn tetapi juga mendukung kesehatan tanaman di tanah dengan kandungan logam berat yang tinggi.

4.3.2 Serapan Zn oleh jaringan *Ochroma grandiflorum rowlee*

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* mengakumulasi logam berat Zn yang bersumber dari tanah tercemar pada lahan TPA Piyungan. Tanaman dengan perlakuan tanpa mikroba (kontrol), logam berat Zn yang terakumulasi di akar sebesar 55,02 mg/kg dan batang 39,15 mg/kg. Tanaman dengan perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR mengakumulasi sebesar 44,65 mg/kg di akar dan 32,73 mg/kg di batang. Tanaman dengan perlakuan *Acaulospora* sp. di akar terakumulasi sebesar 46,65 mg/kg dan pada batang sebesar 79,02 mg/kg. Pada tanaman dengan perlakuan PGPR mampu mengakumulasi 18,95 mg/kg pada akar dan 37,48 mg/kg di batang.

Perlakuan dengan akumulasi logam berat paling tinggi yaitu pada *Acaulospora* sp. yang ditunjukkan pada grafik serapan Zn **Gambar 4.12**. *Acaulospora* sp., salah satu jenis mikoriza arbuskula, memiliki peran penting dalam membantu tanaman menyerap logam berat dari tanah, terutama di lingkungan yang tercemar (Widyawati, 2011). Mikoriza ini membentuk hubungan simbiosis dengan akar tanaman, di mana hifa eksternalnya memperluas jangkauan akar untuk menyerap nutrisi dan logam dari tanah. Selain itu, *Acaulospora* sp. dapat menyimpan logam berat di dalam struktur hifanya, sehingga mengurangi dampak toksik langsung pada tanaman (Hnini et al., 2024). Mekanisme perlindungan terhadap logam berat di akar oleh *Acaulospora* sp. dapat dilakukan melalui efek filtrasi, menonaktifkan secara kimiawi, atau mengakumulasikan logam dalam hifa, sehingga dapat dikatakan bahwa simbiosis yang terjadi menyebabkan peningkatan toleransi tanaman terhadap logam beracun, baik melalui akumulasi logam-logam dalam hifa eksternal sehingga mengurangi serapannya ke dalam tanaman inang maupun mekanisme sekresi logam oleh hifa eksternal (Christofer et al., 2022).



Gambar 4. 12 Perbandingan serapan Zn pada jaringan batang dan jaringan akar tanaman *O. grandiflorum*

Hasil pengukuran berat kering tanaman. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 3 ulangan dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

4.3.3 Perbandingan Serapan Zn oleh jaringan tanaman

Pada **Tabel 4.4** menunjukkan Dalam penyerapan logam Zn oleh tanaman, logam dapat disimpan pada bagian akar maupun batang. Pada umumnya logam Zn di bagian akar dan lebih sedikit di translokasikan pada bagian batang. Berdasarkan hasil observasi oleh Natasha et al. (2022), dari 100 data observasi, sekitar 70% Zn disimpan di akar dan hanya 30% yang berpindah ke batang tanaman. Namun, tingkat penyimpanan ini sangat bervariasi antar spesies tanaman, berkisar antara 10% hingga 99%.

Perbedaan ini dipengaruhi oleh faktor spesifik spesies tanaman, terutama kemampuan mereka menghasilkan senyawa pengikat logam seperti fitokelatin, nikotianamin, dan metalotionein (Sofa et al., 2018). Senyawa ini berperan penting dalam proses penyimpanan Zn di vakuola sel akar. Protein transporter seperti *Metal Tolerance Proteins* (MTPs), terutama MTP1 dan MTP3, juga diketahui berperan dalam mengatur akumulasi Zn di akar dan membatasi perpindahannya ke bagian batang tanaman (Eide, 2011). Hal ini mendukung hasil data sebelumnya bahwa tanaman cenderung menyimpan Zn di akar sebagai bentuk adaptasi terhadap toksisitas logam berat, sekaligus mengurangi akumulasi logam di bagian tanaman yang lebih sensitif atau dikonsumsi (Salinitro et al., 2020; Sousa et al., 2009).

Tabel 4. 4 Perbandingan konsentrasi Zn pada tanaman *S. saman* dan *O. grandiflorum*

Perlakuan		Konsentrasi Logam Berat	
		Batang	Akar
<i>Samanea Saman</i>	K	43,83 ^a ± 7,55	47,82 ^b ± 2,92
	A+P	41,65 ^a ± 5,97	76,18 ^a ± 7,62
	A	40,01 ^a ± 6,50	46,18 ^b ± 4,23
	P	37,74 ^a ± 4,84	43,43 ^b ± 1,11
<i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	K	32,73 ^{ab} ± 1,14	46,64 ^{ab} ± 1,77
	A+P	39,14 ^{ab} ± 6,26	44,65 ^{ab} ± 5,09
	A	79,02 ^a ± 35,43	55,02 ^a ± 5,55
	P	18,95 ^b ± 3,37	37,48 ^b ± 0,81

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan. Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR (A+P).

4.3.4 Karakter serapan logam pada tanaman

Penentuan karakter serapan tanaman berdasarkan besarnya faktor biokonsentrasi (BCF) untuk mengetahui kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat dari dalam tanah dan factor translokasi (TF) untuk mengetahui jumlah logam berat yang ditranslokasikan dari akar ke daun (Putri et al., 2023). Nilai BCF dan TF disajikan pada **Tabel 4.5**. Nilai BCF dihitung sebagai rasio antara konsentrasi racun di dalam organisme dengan konsentrasi racun di lingkungannya. Semakin tinggi nilai rasio ini, semakin besar kemampuan organisme tersebut untuk menyerap dan menahan logam berat, dalam hal ini pada tanaman (Takarina dan Pin, 2017). Nilai biokonsentrasi dan translokasi dapat digunakan untuk menilai kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat. Tanaman dengan nilai faktor biokonsentrasi dan faktor translokasi > 1 dianggap sebagai bioakumulator. Tanaman dengan nilai biokonsentrasi > 1 tetapi translokasi < 1 cocok digunakan untuk fitostabilisasi, sedangkan tanaman dengan nilai biokonsentrasi < 1 dan translokasi > 1 dapat digunakan untuk fitoekstraksi (Takarina dan Pin, 2017).

Tabel 4. 5 Faktor biokonsentrasi dan translokasi logam berat pada tanaman

Jenis Tanaman Perlakuan	Faktor Biokonsentrasi (BCF)	Faktor Translokasi (TF)
<i>Samanea saman</i>		
Kontrol	1,59 ^a ± 0,15	0,9 ^a ± 0,1
<i>Acaulospora</i> sp + PGPR	1,76 ^a ± 0,18	0,57 ^a ± 0,14
<i>Acaulospora</i> sp	1,43 ^{ab} ± 0,24	0,87 ^a ± 0,12
PGPR	0,97 ^b ± 0,75	0,87 ^a ± 0,11

Ochroma grandiflorum rowlee

Kontrol	1,09 ^b ± 0,09	0,70 ^a ± 0,01
<i>Acaulospora sp</i> + PGPR	2,09 ^a ± 0,23	0,93 ^a ± 0,23
<i>Acaulospora sp</i>	2,29 ^a ± 0,07	1,61 ^a ± 0,89
PGPR	1,40 ^b ± 0,12	0,51 ^a ± 0,09

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan.

Berdasarkan hasil analisis pada **Tabel 4.5.** membantu mengidentifikasi kesesuaian mekanisme yang digunakan tanaman dalam mengakumulasi logam berat. Nilai BCF dan TF pada tanaman *Samanea saman* dengan kode kontrol (BCF > 1, TF < 1), konsorsium *Acaulospora sp* + PGPR (BCF > 1, TF < 1), *Acaulospora sp* (BCF > 1, TF < 1), dan PGPR (BCF < 1, TF < 1). Sedangkan pada tanaman *Ochroma grandiflorum rowlee* dengan kode kontrol (BCF > 1, TF < 1), konsorsium *Acaulospora sp* + PGPR (BCF > 1, TF < 1), *Acaulospora sp* (BCF > 1, TF > 1), dan PGPR (BCF < 1, TF < 1).

Kedua tanaman dengan perlakuan sama menunjukkan jenis tanaman akumulator dan menggunakan mekanisme translokasi fitostabilisasi. Nilai faktor translokasi (TF) < 1 yang menandakan bahwa tanaman hanya sedikit mentransfer logam Zn ke pucuk, akumulasi dibatasi pada akar. Fitostabilisasi adalah proses di mana tanaman yang memiliki ketahanan terhadap logam berat digunakan untuk menstabilkan logam berat di dalam tanah. Proses ini bekerja dengan mengurangi mobilitas, toksisitas, dan ketersediaan hayati logam berat di tanah. Tujuan utama fitostabilisasi adalah membatasi pergerakan logam berat agar kontaminan tidak dapat masuk ke dalam siklus air maupun rantai makanan.

S. saman dan *O. grandiflorum* menggunakan mekanisme fitostabilisasi untuk mengakumulasi Zn. Mekanisme fitostabilisasi ini dilakukan dengan cara menonaktifkan atau mengimobilisasi zat toksik atau polutan di dalam akar atau rizosfer. Proses ini melibatkan aktivitas akar tanaman dalam membatasi mobilitas dan ketersediaan hayati kontaminan, sehingga mengurangi efek toksik pada lingkungan sekitar. Beberapa tanaman yang melakukan fitostabilisasi juga membentuk residu terikat dari logam berat untuk mencegah kontaminan tersebut berada dalam bentuk beracun atau dilepaskan kembali setelah akumulasi terjadi.

Pada tanaman *S. saman* dengan perlakuan *Acaulospora sp.* dan PGPR memiliki nilai BCF paling tinggi. Pada Hnini *et al* (2024) saat *Acaulospora sp.* dan PGPR diaplikasikan secara bersamaan, terjadi interaksi sinergis yang lebih efektif. *Acaulospora sp.* memperluas zona penyerapan akar, sementara PGPR merangsang penyerapan dan translokasi. Bersamaan dengan itu, PGPR mengurangi mobilitas dan ketersediaan logam berat pada rizosfer, sehingga

mendukung mekanisme fitostabilisasi. Secara tidak langsung, mikroorganisme membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap logam berat dan mendorong produksi biomassa yang lebih tinggi, yang berkontribusi baik pada penyerapan maupun stabilisasi kontaminan.

Pada tanaman *O. grandiflorum* dengan perlakuan *Acaulospora* sp. menunjukkan perlakuan dengan nilai BCF paling tinggi. Hal ini disebabkan adanya mekanisme perlindungan terhadap logam berat di akar oleh *Acaulospora* sp. dapat dilakukan melalui efek filtrasi, menonaktifkan secara kimiawi, atau mengakumulasi logam dalam hifa, sehingga dapat dikatakan bahwa simbiosis yang terjadi menyebabkan peningkatan toleransi tanaman terhadap logam beracun, baik melalui akumulasi logam-logam dalam hifa eksternal sehingga mengurangi serapannya ke dalam tanaman inang maupun mekanisme sekresi logam oleh hifa eksternal (Christofer et al., 2022).

Tanaman yang menerapkan mekanisme fitostabilisasi mampu tumbuh di tanah yang terkontaminasi logam berat dengan cara mempertahankan logam tersebut tetap berada di bagian bawah tanah, terutama di rizosfer, melalui berbagai mekanisme. Dalam proses ini, tanaman mengikat logam di rizosfer, sehingga logam menjadi kurang tersedia secara hayati dan kurang toksik bagi tanaman, hewan, serta manusia. Selain itu, fitostabilisasi juga dilakukan dengan cara menyerap logam melalui akar, kemudian mengendapkannya dalam bentuk yang lebih stabil seperti karbonat logam, sulfida logam, atau kompleks logam dengan senyawa organik. Mekanisme ini menjadikan logam lebih sulit larut dan lebih aman bagi ekosistem (Putri et al., 2023).

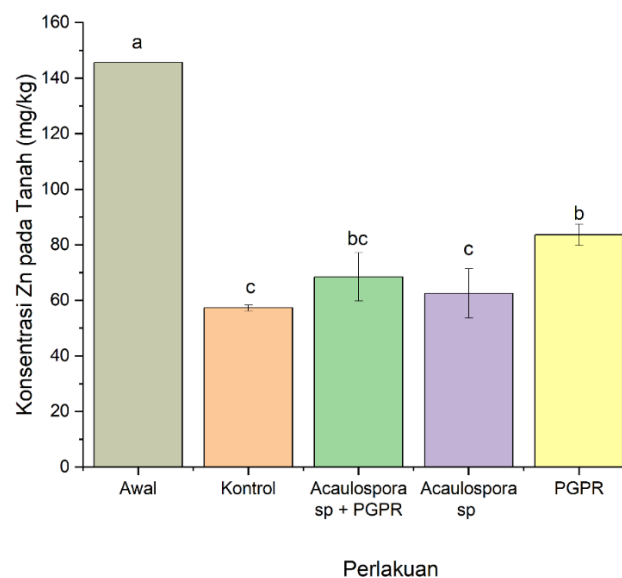
Kedua tanaman ini potensi besar dalam pengelolaan tanah yang terkontaminasi logam berat, karena kemampuan *Acaulospora* sp. dan PGPR dalam melindungi tanaman dari dampak toksisitas logam berat seperti seng (Zn) melalui berbagai mekanisme biologis. AMF mampu mengakumulasi Zn dalam struktur hifanya serta menghasilkan glomalin, suatu protein tanah yang meningkatkan agregasi tanah dan mengikat logam berat, sehingga mengurangi ketersediaannya bagi tanaman. Sementara itu, PGPR berkontribusi dengan memproduksi siderofor yang mengkelat Zn, hormon tumbuh seperti IAA yang merangsang pertumbuhan akar, serta mengaktifkan resistensi sistemik tanaman terhadap stres abiotik. Interaksi sinergis antara AMF dan PGPR terbukti dapat meningkatkan produksi glomalin dan efisiensi penyerapan hara, meskipun tidak selalu memberikan peningkatan signifikan terhadap pertumbuhan tanaman maupun penyimpanan karbon dan nitrogen di tanah, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian (Adeleke, 2010). Hal ini menjadikannya alat yang efektif untuk mengurangi dampak pencemaran logam berat dalam tanah.

4.4. Penurunan Zn pada tanah pasca bio-fitoremediasi

Setelah dilakukan proses remediasi, tanah mengalami penurunan kandungan logam berat seperti seng (Zn). Penurunan ini terjadi karena adanya peran aktif dari berbagai agen biologi, seperti tanaman, mikroorganisme, atau kombinasi keduanya. Tanaman berperan melalui mekanisme fitoremediasi, di mana mereka menyerap logam dari tanah melalui akarnya. Sementara itu, *Acaulospora* sp. dan PGPR membantu meningkatkan ketersediaan dan stabilisasi logam berat, serta mendukung degradasi senyawa berbahaya di tanah. Kombinasi tanaman dan mikroorganisme sering kali memberikan efek sinergis, sehingga mempercepat proses remediasi dan meningkatkan kualitas tanah secara keseluruhan. Konsentrasi logam Zn di tanah TPA Piyungan sebesar 145,61 mg/kg. dengan perlakuan tanaman dan mikroorganisme dapat membantu menurunkannya. Berikut ini pengaruh dari mikroorganisme yang membantu tanaman dalam mereduksi kandungan logam berat Zn:

4.4.1. Penurunan konsentrasi Zn di tanah oleh *Samanea saman*

Berdasarkan hasil penelitian **Gambar 4.13** menunjukkan bahwa tanaman *Samanea saman* membantu mereduksi logam berat Zn yang bersumber dari tanah tercemar pada lahan TPA Piyungan. Kandungan logam berat Zn di tanah awal sebesar 145, 61 mg/kg saat diberi perlakuan terjadi penurunan. Tanaman dengan perlakuan tanpa mikroba (kontrol), logam berat Zn yang tersisa pada tanah uji sebesar 57,31 mg/kg, perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR sebesar 68,52 mg/kg, perlakuan *Acaulospora* sp. sebesar 62,51 mg/kg dan perlakuan PGPR sebesar 83,62 mg/kg.



Gambar 4. 13 Reduksi Zn pasca biofitoremediasi *S. saman*.

Hasil pengukuran berat kering tanaman. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 3 ulangan dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

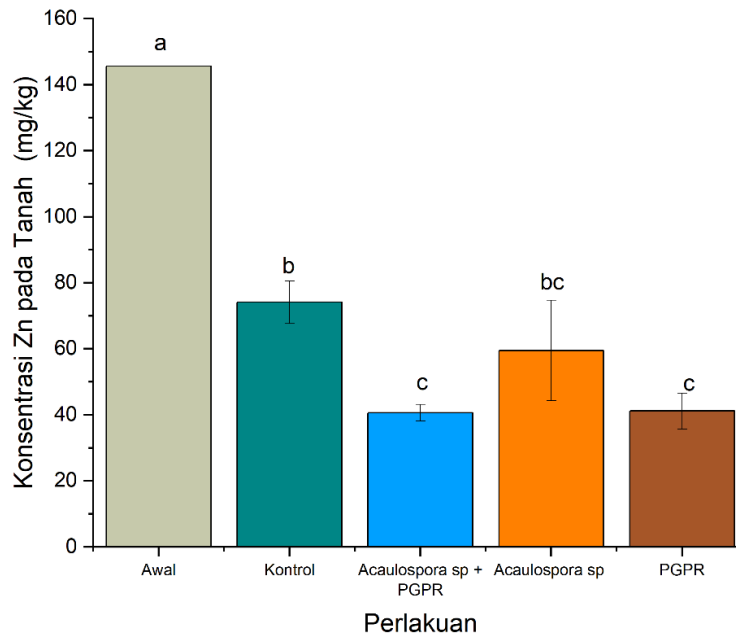
Efisiensi removal dari biofitoremediasi ini pada perlakuan kontrol sebesar 60,64%, perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR sebesar 52,94%, perlakuan *Acaulospora* sp. sebesar 57,07%, dan perlakuan PGPR sebesar 42,57%. Konsentrasi logam Zn pada perlakuan kontrol menunjukkan adanya perbedaan secara signifikan ($P < 0,05$) dibandingkan pada tanah awal. Hal ini menunjukkan dengan perlakuan tanaman *S. saman* saja dapat mereduksi kandungan logam berat pada tanah terkontaminasi. Sama halnya dengan perlakuan kontrol, perlakuan dengan tambahan mikroorganisme dapat menurunkan konsentrasi logam berat. Pada urutan kedua tanah TPA yang mengalami penurunan konsentrasi logam berat yaitu perlakuan *Acaulospora* sp.

S. saman, dikenal sebagai pohon hujan atau trembesi, merupakan spesies pohon yang memiliki kemampuan dalam fitoremediasi, yaitu proses penyerapan dan akumulasi logam berat dari tanah. Penelitian menunjukkan bahwa *S. saman* efektif dalam menyerap logam berat seperti merkuri (Hg) dari tanah yang terkontaminasi (Kilikily dan Mariwy, 2020). Kemampuan ini menjadikannya pilihan potensial untuk rehabilitasi lahan yang tercemar logam berat.

Selain itu, AMF seperti *Acaulospora* sp. berperan penting dalam meningkatkan serapan logam berat oleh tanaman. AMF membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, membantu meningkatkan ketersediaan dan penyerapan nutrisi serta logam berat. Penelitian menunjukkan bahwa inokulasi *Acaulospora* sp. dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan serapan logam berat pada media tanah yang terkontaminasi (Bashri et al., 2014). Dengan demikian, kombinasi antara *S. saman* dan *Acaulospora* sp. berpotensi meningkatkan efisiensi fitoremediasi tanah yang tercemar logam berat.

4.4.2. Penurunan konsentrasi Zn di tanah oleh *Ochroma grandiflorum* rowlee

Hasil penelitian pada **Gambar 4.14** menunjukkan bahwa tanaman membantu mereduksi logam berat Zn yang bersumber dari tanah tercemar pada lahan TPA Piyungan. Kandungan logam berat Zn di tanah awal sebesar 145,61 mg/kg saat diberi perlakuan terjadi penurunan. Tanaman dengan perlakuan tanpa mikroba (kontrol), logam berat Zn yang tersisa pada tanah uji sebesar 73,95 mg/kg, perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR sebesar 40,66 mg/kg, perlakuan *Acaulospora* sp. sebesar 59,50 mg/kg dan perlakuan PGPR sebesar 41,15 mg/kg. Efisiensi removal dari biofitoremediasi ini pada perlakuan kontrol sebesar 49,21%, perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR sebesar 72,07 %, perlakuan *Acaulospora* sp. sebesar 59,14% dan perlakuan PGPR sebesar 71,74%.



Gambar 4. 14 Konsentrasi Zn pada Tanah oleh tanaman *S.saman*

Setiap nilai merupakan rata-rata dari 3 ulangan dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

Konsentrasi logam Zn pada perlakuan *Acaulospora* sp. dan PGPR menunjukkan adanya perbedaan secara signifikan ($P < 0,05$) dibandingkan pada tanah awal. Hal ini menunjukkan dengan perlakuan kedua mikroorganisme dapat membantu tanaman mereduksi logam berat Zn dari tanah. *Acaulospora* sp. dapat memfasilitasi proses fitoremediasi dengan membuat logam lebih mudah diserap atau mengurangi penyerapannya. *Acaulospora* sp. berkontribusi pada fitoremediasi dengan mempertahankan logam berat pada miselium jamur (sebagai penghalang fisik) dan imobilisasi mereka di dalam tanah dengan gloaming, mengurangi bioavailabilitas, translokasi, dan bioakumulasi mereka di dalam jaringan tanaman. Imobilisasi logam di dalam hifa jamur (dengan kelasi dan sekuestrasi) mungkin merupakan mekanisme perlindungan utama yang diberikan pada tanaman oleh mikoriza (Raklami et al., 2022).

4.4.3. Perbandingan penurunan konsentrasi Zn di tanah

Pada Tabel 4.6 menunjukkan perbandingan konsentrasi logam Zn di tanah pasca biofitoremediasi menggunakan *Acaulospora* sp. dan PGPR. Berdasarkan data tersebut perlakuan

Tabel 4. 6 Konsentrasi logam Zn di tanah setelah biofitoremediasi

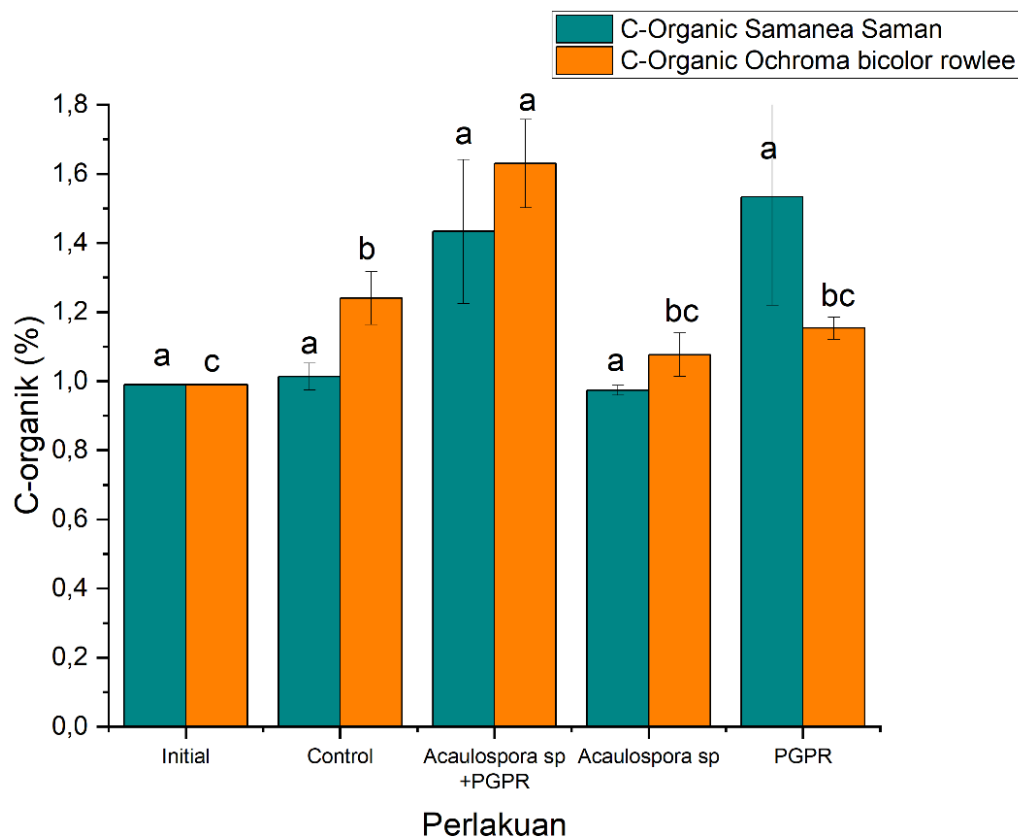
Perlakuan		Konsentrasi Logam Berat (mg/kg)
		Tanah
Initial		145,61 ^a ± 0,004
<i>Samanea Saman</i>	K	57,31 ^c ± 1,07
	A+P	68,52 ^{bc} ± 8,69
	A	62,61 ^c ± 8,84
	P	83,62 ^b ± 3,88
<i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	K	74,13 ^{bc} ± 6,47
	A+P	40,66 ^b ± 2,51
	A	59,50 ^c ± 15,24
	P	41,53 ^c ± 5,42

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan. Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium *Acaulospora* sp. + PGPR (A+P).

4.5. Kadar C-organik

Karbon organik (c-organik) **Gambar 4.15** menunjukkan persentase pada tanah yang ditanam dengan *S. saman* dan *O. grandiflorum* di bawah berbagai perlakuan. Perlakuan yang digunakan meliputi: kondisi awal (tanpa perlakuan), kontrol (tanpa aplikasi mikroorganisme), aplikasi *Acaulospora* sp. + PGPR, *Acaulospora* sp. saja, dan PGPR saja. Kandungan C-organik pada kondisi awal berada dalam kondisi rendah yaitu 0,99%. Pada perlakuan kontrol dengan nilai C-organik, terdapat peningkatan C-organik dibandingkan kondisi awal. *Acaulospora* sp. + PGPR menunjukkan kandungan C-organik tertinggi pada untuk *S. saman*. Mekanisme ini terjadi karena sinergi antara fungi mikoriza arbuskula dan PGPR yang meningkatkan stabilisasi bahan organik, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan serapan karbon oleh tanaman (Raklami et al., 2022). Aplikasi *Acaulospora* sp. menghasilkan nilai C-organik yang menurun. Hal ini mungkin terjadi karena fungi mikoriza cenderung lebih efektif ketika bekerja Bersama PGPR, dalam meningkatkan kandungan karbon organik tanah. Pada tanaman *O. grandiflorum*, tanah dengan perlakuan PGPR lebih baik daripada perlakuan lainnya. Hal ini disebabkan oleh kemampuan PGPR dalam merangsang pertumbuhan tanaman

dan meningkatkan produksi eksudat akar yang kaya karbon, sehingga meningkatkan kandungan bahan organik tanah (Raklami et al., 2022).



Gambar 4.15. Ketersediaan C-organik pasca biofitoremediasi.

Hasil pengukuran berat kering tanaman. Setiap nilai merupakan rata-rata dari 3 ulangan dan rerata yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

Tabel 4.7 Ketersediaan C-organik di tanah

Perlakuan		Konsentrasi C-Organik (%)
Initial		0,99 ^a ± 0,00
<i>Samanea Saman</i>	K	1,01 ^a ± 0,04
	A+P	1,43 ^a ± 0,21
	A	0,97 ^a ± 0,01
	P	1,53 ^a ± 0,31
<i>Ochroma grandiflorum rowlee</i>	K	1,24 ^b ± 0,08
	A+P	1,63 ^a ± 0,13
	A	1,15 ^{bc} ± 0,06
	P	1,22 ^{bc} ± 0,03

Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga ulangan, dengan ± menunjukkan standar error. Nilai pada setiap parameter yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Data dianalisis dengan ANOVA dan uji *post-hoc* Duncan. Kode perlakuan kontrol (K), konsorsium Acaulospora sp. + PGPR (A+P).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan:

1. Inokulasi PGPR dan AMF tanpa kombinasi memberikan keuntungan terhadap pertumbuhan tanaman. Inokulasi PGPR pada *Samanea saman* membantu tinggi tanaman (92,08 cm), diameter (7,74 mm), berat kering (16,83 g). Sedangkan pada *Ochroma grandiflorum rowlee* inokulasi *Acaulospora sp.* membantu pertumbuhan tinggi tanaman (41,40 cm), diameter (5,53 mm), berat kering (4,81 g).
2. Pengaruh inokulasi AMF, PGPR, dan tanaman menguntungkan terhadap serapan logam berat Zn dan ketersediaan C-organik di TPA Piyungan. Pada serapan Zn, PGPR membantu tanaman dalam menyerap Zn pada akar tanaman *Samanea saman* dengan menggunakan mekanisme fitostabilisasi, efisiensi removal pada tanah mencapai 42,57% serta penambahan konsentrasi C-organik 30,7 % dari kondisi semula. Sedangkan pada *Ochroma grandiflorum rowlee* perlakuan *Acaulospora sp.* membantu tanaman menyerap Zn dengan mekanisme fitostabilisasi, efisiensi removal dari tanah sebesar 59,14 % dan peningkatan C-organik 0,05% dari kondisi semula.

Dengan demikian perlakuan inokulasi secara individu AMF dan PGPR menunjukkan keuntungan yang lebih unggul dalam parameter pertumbuhan daripada perlakuan dengan inokulasi kombinasi atau tanaman saja. Dalam beberapa parameter seperti serapan logam, efisiensi penyisihan, dan ketersediaan C-organik di tanah lebih unggul apabila di inokulasi baik kombinasi AMF dan PGPR maupun tanaman saja.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan penulis:

1. Perlu dilakukan variasi dosis untuk mikroorganisme yang digunakan guna melihat tingkat efektivitas dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dan serapan.
2. Karakterisasi kimiawi awal pada tanaman sebelum penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeleke, A. B. (2010). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria on glomalin production. University of Saskatchewan.
- Aditya Putri, F. (2024). Pengaruh degradasi lahan terhadap keberlanjutan pertanian padi di Indonesia hasil survei pertanian terintegrasi (SITASI) 2021. *Seminar Nasional Official Statistics 2024*, 111–116.
- Agus, C., Putra, P. B., Faridah, E., Wulandari, D., & Napitupulu, R. R. P. (2016). Organic carbon stock and their dynamics in rehabilitation ecosystem areas of post open coal mining at tropical region. *Procedia Engineering*, 159, 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.201>
- Agustina, T. (2014). Kontaminasi logam berat pada makanan dan dampaknya pada kesehatan. *TEKNOBUGA*, 1(1), 53–65.
- Alam, P., Sharholly, M., & Ahmad, K. (2020). A study on the landfill leachate and its impact on groundwater quality of Ghazipur area, New Delhi, India. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 57, pp. 345–358). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2_27
- Alvarez, J. M., Novillo, J., Obrador, A., & López-Valdivia, L. M. (2001). Mobility and leachability of zinc in two soils treated with six organic zinc complexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(8), 3833–3840. <https://doi.org/10.1021/jf010037i>
- Amalia, A., Zumaidar, Z., & Amalia, A. (2023). Contamination levels of Pb heavy metals and availability of phytoremediation plants in the Gampong Jawa Landfill Area, Banda Aceh City. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(9), 6780–6786. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i9.4474>
- Arini Tiwow, V., & Jeanne Rampe, M. (2022). Analisis kandungan logam berat tanah TPA Antang Makassar menggunakan metode XRF. *Seminar Nasional Hasil Penelitian*, 1999–2006.
- Arlina, S., Advinda, L., Chatri, M., & Hilda Putri, D. (2024). Peran bakteri pelarut fosfat dalam pertanian berkelanjutan. *Serambi Biologi*, 9(1), 158–163.
- Ashrafuzzaman, M., Hossen, F. A., Razi Ismail, M., Hoque, A., Islam, M. Z., Shahidullah, S. M., & Meon, S. (2009). Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *African Journal of Biotechnology*, 8(7), 1247–1252. <http://www.academicjournals.org/AJB>
- Baran, A. (2012). Assessment Of Zinc Content And Mobility In Maize Ocena Zawartości I Mobilności Cynku W Kukurydzy. *Ecol Chem Eng*, 19(7), 699–706. [https://doi.org/10.2428/ecea.2012.19\(07\)069](https://doi.org/10.2428/ecea.2012.19(07)069)
- Baran, A., Wieczorek, J., Mazurek, R., Urbański, K., & Klimkowicz-Pawlas, A. (2018). Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(1), 435–450. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>
- Bashri, A., Utami, B., & Primandiri, P. R. (2014). pertumbuhan bibit trembesi (*Samanea saman*) dengan inokulasi cendawan mikoriza ARBUSKULA PADA MEDIA BEKAS

tempat pembuangan akhir (TPA) KLOTOK KEDIRI. Seminar Nasional XI Pendidikan Biologi FKIP UNS 165.

- Chairunnisya, R. A., Hanum, H., & Hidayat, B. (2017). Aplikasi bahan organik dan biochar untuk meningkatkan C-Organik, P dan Zn tersedia pada Tanah Sawah. *Jurnal Agroekoteknologi*, 5(3), 494–499.
- Charlena, Haris, A., & Karwati. (2009). Degradasi hidrokarbon pada tanah tercemar minyak bumi dengan isolat A10 dan D8. *Prosiding Seminar Nasional Sains II*.
- Charomainsi, M., & Nana K. W. (2005). Skarifikasi benih dan penggunaan atonik dalam peningkatan pertumbuhan semai balsa. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 80–87.
- Christofer, F., Puspita Sari, S., Sapulette, K., Anggayni, M., Hutagalung, E., & Irawati, W. (2022). Mikorizoremediasi: Asosiasi Fungi Mikoriza Arbuskula dalam Meningkatkan Kemampuan Penyerapan Logam pada Tanaman Hiperakumulator di Lahan Pertambangan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(1), 118–125.
- Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P. I., Fall, D., Hocher, V., & Svistoonoff, S. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: importance in biotic and abiotic stressed regulation. *In Diversity* (Vol. 12, Issue 10, pp. 1–25). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/d12100370>
- Dighe, N. S., Shukla, D., Kalkotwar, R. S., Laware, R. B., Bhawar, S. B., & Gaikwad, R. W. (2010). Nitrogenase Enzyme: A Review. *Der Pharmacia Sinica*, 1, 77–84. www.pelagiaresearchlibrary.com
- Dinas Pertanian. (2024). Mengenal Rhizobium: Mikroba Penambat Nitrogen yang Bersahabat dengan Tanaman. Dinas Pertanian.
- Durumin, I. N. I., Assim, Z. B., Omorinoye, O. A., & Asare, E. A. (2022). Phytoremediation of heavy metals from landfill soil using *Polyscias fruticosa*. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 15(1), 210–219. <https://doi.org/10.4314/bajopas.v15i1.30>
- Eide, D. J. (2011). The oxidative stress of zinc deficiency. *In Metallomics* (Vol. 3, Issue 11, pp. 1124–1129). <https://doi.org/10.1039/c1mt00064k>
- Elango, D., Devi, K. D., Jeyabalakrishnan, H. K., Rajendran, K., Thoomatti Haridass, V. K., Dharmaraj, D., Charuchandran, C. V., Wang, W., Fakude, M., Mishra, R., Vembu, K., & Wang, X. (2022). Agronomic, breeding, and biotechnological interventions to mitigate heavy metal toxicity problems in agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100374>
- Ernita, M., & Zulman Harja Utama, M. (2023). Pengaruh Zat Pengatur Tumbuh Alami dan Sintetik terhadap Pertumbuhan Bbit Kelapa Sawit. *Jurnal Agrotek*, 7(2), 186–194.
- Etim, E., & Etim, E. E. (2012). Phytoremediation and Its Mechanisms: A Review. *International Journal of Environment and Bioenergy*, 2012(3), 120–136. <https://www.researchgate.net/publication/312443920>
- Euis Eka Pramiasih, O., Febriana, A., Windu Antika, R., Khusnul Khotimah, I., Nur Ahmad, D., Sudaryanto, S., & Kemenkes Yogyakarta, P. (2023). Pengelolaan sampah organik rumah tangga menggunakan losida (lodong sisa dapur) di Dusun Drono Sleman Daerah Iatimewa Yogyakarta. *JPM Jurnal Pengabdian Mandiri*, 2(5), 1107–1112. <http://bajangjournal.com/index.php/JPM>

- Eviati, Sulaeman, Hewawaty, L., Anggria, L., Usman, Tantika, H. E., Prihatini, R., & Wuningrum, P. (2023). Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air dan pupuk. In I. A. Sipahutar, H. Wibowo, A. F. Siregar, L. R. Widowati, & T. Rostaman (Eds.), *Petunjuk Teknis Edisi* (3rd ed., Vol. 3). Kementerian Pertanian Republik Indonesia. <https://tanahpupuk.bsip.pertanian.go.id>
- Finmeta, A. W., Mansur, I., & Wulandari, A. S. (2018). Pemanfaatan fungi mikoriza arbuskula lokal dan tanaman inang *Desmodium* spp. UNTUK MENINGKATKAN PERTUMBUHAN BIBIT CENDANA (*Santalum album* Linn.). *Journal of Tropical Silviculture*, 9(1), 37–43. <https://doi.org/10.29244/j-siltrop.9.1.37-43>
- Flynn, R., & Idowu, J. (2015). Nitrogen Fixation by Legumes Guide A-129.
- Hajoeningtjas, O. D., Faiqoh Mardatin, N., Suyadi, A., & Ma'ruf, F. (2024). Journal of Tropical Mycorrhiza Characterization of Indigenous Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Seedlings and Production of Pepper (*Piper nigrum* L.) Cultivation. <https://journal.ami-ri.org/index.php/JTM>
- Halomoan Sipahutar, A., & Marbun, P. (2014). Kajian C-Organik, N dan P humitropepts pada ketinggian tempat yang berbeda di Kecamatan Lintong Nihuta Study of C-Organic N, and P of Humitropepts at Different Altitude in Sub-District of Lintong Nihuta. *Jurnal Online Agroteknologi*, 2(4), 1332–1338.
- Hamim, H., Miftahudin, M., & Setyaningsih, L. (2018). Cellular and ultrastructure alteration of plant roots in response to metal stress. In *Plant Growth and Regulation - Alterations to Sustain Unfavorable Conditions*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79110>
- Hnini, M., Rabeh, K., & Oubohssaine, M. (2024). Interactions between beneficial soil microorganisms (PGPR and AMF) and host plants for environmental restoration: A systematic review. In *Plant Stress* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100391>
- Irhamni, Pandia, S., Purba, E., & Hasan, W. (2017). Serapan logam berat esensial dan non esensial pada air lindi TPA Kota Banda Aceh dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. *Serambi Engineering*, II.
- Istiqomah, F. N., Budi, S. W., & Wulandari, A. S. (2017). The role of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and humid acid toward *Balsa* (*Ochroma bicolor* Rowlee.) growth on soil contaminated by lead (Pb). *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 7(1), 72–78. <https://doi.org/10.19081/jpsl.2017.7.1.72>
- Jing, Y. X., Yan, J. L., He, H. D., Yang, D. J., Xiao, L., Zhong, T., Yuan, M., de Cai, X., & Li, S. Bin. (2014). Characterization of bacteria in the rhizosphere soils of *Polygonum pubescens* and their potential in promoting growth and Cd, Pb, Zn uptake by *Brassica napus*. *International Journal of Phytoremediation*, 16(4), 321–333. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.773283>
- Juhriah, C., & Mir Alam, dan. (2016). Fitoremediasi logam berat merkuri (hg)pada tanah dengan tanaman *Celosia plumosa* (Voss) Burv. (Vol. 1).
- Juhriah, Zakariah, M., & Ruslan, M. (2023). Fitoremediasi tanaman hias bunga *Impatiens Balsamina* L., dan *Zinnia Elegans* (Jacq.) Kuntze terhadap polutan merkuri pada tanah. 8(2), 1–9. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/bioma>

- Junianti, E., Proklamasiningsih, E., & Purwanto, P. (2020). Efek inokulasi PGPR terhadap pertumbuhan tanaman padi fase vegetative di media salinitas tinggi. *Jurnal AGRO*, 7(2), 193–202. <https://doi.org/10.15575/8057>
- Karmila, Mustafa, M., dan Mustafa, R. (2023). The effect of gibberellin acid and PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) from Bamboo Roots on Growth and Results Two Varieties Cucumber Plants (*Cucumis sativus* L.). *Perbal: Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 11(2), 172–183.
- Kilikily, D., & Mariwy, A. (2020). Studi Akumulasi logam berat merkuri (Hg) pleh tanaman trembesi (*Samanea saman*). *Scie Map J*, 2(2).
- Kumar, K. V., Singh, N., Behl, H. M., & Srivastava, S. (2008). Influence of plant growth promoting bacteria and its mutant on heavy metal toxicity in *Brassica juncea* grown in fly ash amended soil. *Chemosphere*, 72(4), 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.025>
- Lal, R. (2006). Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation and Development*, 17(2), 197–209. <https://doi.org/10.1002/ldr.696>
- Lutfiah, I., Sulistyawati, & Pratiwi, S. P. (2021). Pengaruh dosis nitrogen terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman terung ungu (*Solanum melongena* L. var. Hibrida F1 Antaboga). *Jurnal Agroteknologi Merdeka Pasuruan*, 5(1), 1–6.
- Maharani, K. E., Aini, N., & Aini, L. Q. (2017). Kemampuan dua spesies enterobacter sp. Sebagai bakteri pemacu pertumbuhan tanaman kentang (*Solanum tuberosum* L.) Pada kondisi cekaman kekeringan. *Buana Sains*, 17, 85–94.
- Mahfuza, N., Hanim, N., Amin, N., & Studi Pendidikan Biologi FTK UIN Ar-Raniry Banda Aceh, P. (2022). Jenis tumbuhan yang terdapat dibawah naungan tumbuhan trembesi (*Samanea saman*) di kampus UIN AR-RANIRY BANDA ACEH (Vol. 10, Issue 1). <https://jurnal.ar-raniry.ac.id/index.php/PBiotik/index>
- Marfuah, C., Farid, D., & Majid, A. (2008). Uji kemampuan beberapa jenis Natural Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kangkung di Kecamatan Wanasaba Kabupaten Lombok Timur.
- Marom, N., Rizal, F., & Bintoro, M. (2017). Uji Efektivitas Saat Pemberian dan Konsentrasi PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) terhadap Produksi dan Mutu Benih Kacang Tanah (*Arachis hypogaea* L.). *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 1(2), 174–184. <https://doi.org/10.25047/agriprima.v1i2.43>
- Mayang Wardhika, C., Hadisutrisno, B., & Jaka Widada. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi potential in improving growth and health of sugarcane seed. *Ilmu Pertanian*, 18(2), 84–91.
- Mertens, J., & Smolders, E. (2013). Zinc (pp. 465–493). https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_17
- Meyrita, Sandria, S. F., Najmi Istafan, Firdus, Rizki, A., & Nasir, M. (2023). Kontaminasi logam berat pada air sumur warga akibat air lindi dari tempat pemrosesan akhir. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(2), 425–433.
- Miska, M. E. E., Junaedi, A., Wachjar, A., & Irdika Mansur, dan. (2016). Characterization of

- Arbuscular Mycorrhizal Fungus from Sugar Palm (*Arenga pinnata* (Wurmb) Merr. West Java and Banten. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 07(1), 18–23.
- Montenegro, O., Magnitskiy, S., & Darghan, A. (2019). Effect of nitrogen and potassium on plant height and stem diameter of *Jatropha curcas* L. in Colombian tropical dry forest. *Agronomia Colombiana*, 37(3), 239–248. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.78172>
- Muryati, S., Mansur, I., Sri, D., & Budi, W. (2016). Keanekaragaman Fungi Mikoriza Arbuskula pada rizosfer *Desmodium* spp. asal PT. Cibaliung Sumberdaya, Bante. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 07(3), 188–197.
- Muslimah. (2015). Dampak pencemaran tanah dan langkah pencegahan. *Agrisamudra*, 2(1), 11–20.
- Muyassar, M., & Budianta, W. (2021). Pencemaran logam berat pada tanah di sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) SAMPAH PIYUNGAN, BANTUL, YOGYAKARTA. 6(1), 11–22.
- Natasha, N., Shahid, M., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B., Bakhat, H. F., Farooq, A. B. U., Amjad, M., Hammad, H. M., Niazi, N. K., & Arshad, M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *In Science of the Total Environment* (Vol. 808). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152024>
- Noor, I. M. M. (2013). Analisis kandungan logam berat di dalam air tanah di TPA Gunung Tugel Banyumas.
- Nopphakat, K., Runsaeng, P., & Klinnawee, L. (2022). Acaulospora as the dominant arbuscular mycorrhizal fungi in organic lowland rice paddies improves phosphorus availability in soils. *Sustainability* (Switzerland), 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010031>
- Nurholis, Choirul Umam, Mohammad Syafii, Erika Nor Damayanti, Syaifullah, Dery Anugerah Dermawan, & Ach Supyanto. (2023). Penerapan metode digital untuk mengukur indeks luas daun tanaman sawi caisim (*Brassica Juncae* L.). *Jurnal Pengelolaan Perkebunan (JPP)*, 4(1), 8–15. <https://doi.org/10.54387/jpp.v4i1.30>
- Olaniran, A. O., Balgobind, A., & Pillay, B. (2013). Bioavailability of heavy metals in soil: Impact on microbial biodegradation of organic compounds and possible improvement strategies. *In International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 14, Issue 5, pp. 10197–10228). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms140510197>
- Priadie, B., Muda Bidang Teknik Lingkungan SDA, P., Litbang Sumber Daya Air, P., & Ji Ir H Juanda, K. P. (2012). Teknik bioremediasi sebagai alternatif dalam upaya pengendalian pencemaran air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 10(1), 38–48. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ilmulingkungan>
- Proborini, M. W., Daymayasa, I. B. G., Yusup, D. S., & Subagio, J. N. (2020). Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) *Gigaspora* spp sebagai pupuk hayati pada pembibitan Mete (*Anacardium occidentale* L.). *Jurnal Mikologi Indonesia*, 4(2), 193. <https://doi.org/10.46638/jmi.v4i2.97>
- Rahadi, B., Susanawati, L. D., & Agustianingrum, R. (2020). Bioremediation of Lead using Indigenous Bacteria Isolated from Leachete Contaminated Soil. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 11–18.

- Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K., & Baslam, M. (2022). Plants-microorganisms-based bioremediation for heavy metal cleanup: recent developments, phytoremediation techniques, regulation mechanisms, and molecular responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9). <https://doi.org/10.3390/ijms23095031>
- Rini, M. V., Oka Pertiwi, K., & Saputra, H. (2017). Seleksi lima isolat sungi mikoriza arbuskular untuk kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di pembibitan. *Jurnal Agrotek Tropika*, 5(3), 138–143.
- Rini, M. V., Suharjo, R., Wibowo, L., Irvanto, D., & Ariyanto, A. (2021). Selection of four types arbuscular mycorrhizal fungi in oil palm seedling planted in histosol soil. *E-Journal Menara Perkebunan*, 89(1). <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v89i1.406>
- Rosniawaty, S., Anjarsari, I. R. D., & Sudirja, R. (2018). Aplikasi sitokinin untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman teh di dataran rendah. *Tanaman Industri dan Penyebar*, 3, 31–38.
- Rossiana, N., Riscahya, P. R. S., & Doni, F. (2023). Aplikasi Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence - AI) dalam Biofitoremediasi Limbah Organik (T. Suganda & A. Hamid, Eds.; 1st ed.).
- Salinitro, M., van der Ent, A., Tognacchini, A., & Tassoni, A. (2020). Stress responses and nickel and zinc accumulation in different accessions of *Stellaria media* (L.) Vill. in response to solution pH variation in hydroponic culture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.012>
- Sapalina, F., Noviandi Ginting, E., & Hidayat, F. (2022a). Bakteri penambat nitrogen sebagai agen biofertilizer. *WARTA Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, 27(1), 41–50. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v27i1.80>
- Sapalina, F., Noviandi Ginting, E., & Hidayat, F. (2022b). Bakteri Penambat Nitrogen Sebagai Agen Biofertilizer. *WARTA Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, 27(1), 41–50. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v27i1.80>
- Sari, R., & Prayudyaningsih, R. (2015). Rhizobium: Pemanfaatannya Sebagai Bakteri Penambat Nitrogen Ramdana Sari dan Retno Prayudyaningsih Rhizobium: pemanfaatannya sebagai bakteri penambat nitrogen. *Info Teknis EBONI*, 12, 51–64.
- Schulte, E. E. (2004). *Soil and Applied Zinc*. Cooperative Extension Publications.
- Setyaningsih, L., Ramadhani, F. A., Muttaqin, Z., & Maslahat, M. (2024). Positive interaction of trembesi (*Samanea saman*) and arbuscular mycorrhizae fungi in Pb stabilization of gold-mine tailing media. *Biodiversitas*, 25(1), 379–385. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250144>
- Shailendra Singh, G. G. (2015). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Current and Future Prospects for Development of Sustainable Agriculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 07(02). <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000188>
- Smith, J. E. (2009). *Mycorrhizal Symbiosis* (Third Edition). Soil Science Society of America Journal, 73(2), 694–694. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0015br>
- Sofo, A., Moreira, I., Gattullo, C. E., Martins, L. L., & Mourato, M. (2018). Antioxidant responses of edible and model plant species subjected to subtoxic zinc concentrations. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 261–268.

<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.010>

- Sousa, S. F., Lopes, A. B., Fernandes, P. A., & Ramos, M. J. (2009). The Zinc proteome: A tale of stability and functionality. *Dalton Transactions*, 38, 7946–7956. <https://doi.org/10.1039/b904404c>
- Sugiarti, L., & Taryana, Y. (2018). Pengaruh pemberian takaran fungi mikoriza arbuskular (FMA) terhadap pertumbuhan bibit kopi arabika (*Coffea arabica* L.). *Jurnal AGRO*, 5(1), 61–65. <https://doi.org/10.15575/1813>
- Suharjo, M. H., & Ernawati, R. (2022). Cekaman Logam Berat Cromium Terhadap Tanaman (Chromium Heavy Metal Stress on Plants). *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 10(1), 8–16.
- Suharno, & Sancayaningsih, R. P. (2013). Fungi Mikoriza Arbuskula: Potensi Teknologi Mikorizoremediasi Logam Berat dalam Rehabilitasi Lahan Tambang. *Bioteknologi*, 10(1), 23–24. <https://doi.org/10.13057/biotek/c100104>
- Sukarno, N., Rahmawati, C., Listiyowati, S., Fadillah, W. N., & Novera, Y. (2023). Isolation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi from Rhizosphere of Bangka Island Woody Plants and their Mycorrhizal Structure Culture Characteristics. *Jurnal Sumberdaya Hayati*, 9(2), 39–48. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/sumberdayahayati>
- Sukono, G. A. B., Hikmawan, F. R., Evitasari, E., & Satriawan, D. (2020). Mekanisme Fitoremediasi: Review. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 2(2), 40–47. <https://doi.org/10.35970/jppl.v2i2.360>
- Supriyantini, E. dan Soenardjo, N. (2015). Kandungan logam berat Timbal (Pb) Dan Tembaga (Cu) pada akar dan buah mangrove *Avicennia marina* di Perairan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*. 18(2), 98–106.
- Takarina, N. D., & Pin, T. G. (2017). Bioconcentration Factor (BCF) and Translocation Factor (TF) of Heavy Metals in Mangrove Trees of Blanakan Fish Farm. *Makara Journal of Science*, 21(2). <https://doi.org/10.7454/mss.v21i2.7308>
- Tanwar, A., Aggarwal, A., Kadian, N., & Gupta, A. (2013). Arbuscular mycorrhizal inoculation and super phosphate application influence plant growth and yield of *Capsicum annuum*. In Tanwar et al. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* (Vol. 13, Issue 1).
- Umar, Y., Sutariati, G. A. K., & Rambon, F. S. (2024). Pengaruh Perlakuan Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) dan Pupuk Organik Plus terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill) pada Tanah Pasca Tambang Nikel. *Journal of Agronomi Research*, 12(1), 43–55. <https://doi.org/10.33772/bpa.v12i1.1016>
- Vatra, R. P. R., & Arifin. (2023). Pengolahan Air Lindi TPA Batu Layang Menggunakan Metode Elektrokoagulasi dan Filtrasi. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(2), 737–744. <https://doi.org/10.33379/gtech.v7i2.2467>
- Wahyunto, & Dariah, A. (2014). Degradasi Lahan di Indonesia: Kondisi Existing, Karakteristik, dan Penyeragaman Definisi Mendukung Gerakan Menuju Satu Peta. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12, 81–93.
- Wang, F. Y., Lin, X. G., & Yin, R. (2007). Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on heavy metal accumulation of maize grown in a naturally contaminated soil.

- Wicaksono, F. Y., Nurmala, T., Irwan, A. W., & A.S.U. Putri. (2016). Pengaruh pemberian gibberellin dan sitokinin pada konsentrasi yang berbeda terhadap pertumbuhan dan hasil gandum (*Triticum aestivum* L.) di dataran medium Jatinangor. *Jurnal Kultivasi*, 5, 52–58.
- Widawati, S., & Muharam, dan A. (2010). Aplikasi pupuk organik dan bakteri pelarut fosfat untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman tomat dan aktivitas mikroba tanah.
- Widyawati, E. (2011). Potensi tumbuhan bawah sebagai akumulator logam berat untuk membantu rehabilitasi lahan bekas tambang. *Mitra Hutan Tanaman*, 6, 47–56.
- Wulandari, D., Rosita, R., & Ahdiar Fikri Maulana. (2023). Screening of Phosphate Solubilizing Microorganisms Collected from Post Tin Mining: Potency for Future Mining Rehabilitation. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 15(1), 18–30. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol15.iss1.art2>
- Wulandari, D., Tawaraya, K., Cheng, W., & Agus, C. (2014). Efficacy of native arbuscular mycorrhizal fungi in promoting growth of *Albizia saman* in coal mine spoil-bank: a prospect in restoring mined tropical forest, Indonesia. <https://www.researchgate.net/publication/303974572>
- Putri, R., Loekitowati, P., Arifin, Z., (2023). Biokonsentrasi Faktor (BCF) dan Faktor Translokasi (TF) Purun tikus (*Eleocharis dulcis*) dalam Fitoremediasi Air Asam Tambang Bioconcentration Factors (BCF) and Translocation Factors (TF) Purun Tikus (*Eleocharis dulcis*) in Phytoremediation of Acid Mine Drainage. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(1).
- Xie, X., Weng, B., Cai, B., Dong, Y., & Yan, C. (2014). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus supply on the growth and nutrient uptake of *Kandelia obovata* (Sheue, Liu & Yong) seedlings in autoclaved soil. *Applied Soil Ecology*, 75, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.11.009>
- Yulianto, R., M., Safitri, E., Sintya, I., Savira, W., Fitrihidajati, H., Rachmardiarti, F., & Lailani, I. (2021). Kemampuan enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) sebagai Agen fitoremediasi LAS (Linier Alkyl Benzene Sulphonate) Detergen. *Prosiding SEMNAS BIO 2021*.
- Zanzibar, M. (2017). The Type of Dormancy and Pre-Treatment for Breaking Dormancy of Balsa (*Ochroma bicolor* ROWLEE) Seed. *Jurnal Perbenihan Tanaman Hutan*, 5(1), 51–60. <https://doi.org/10.20886/bptpth.2017.5.1.51-60>
- Zhang, Z., Zhou, Z., Feng, S., Guo, P., Wang, Y., Hao, B., Guo, W., & Li, F. Y. (2024). Synergistic effects of AMF and PGPR on improving saline-alkaline tolerance of *Leymus chinensis* by strengthening the link between rhizosphere metabolites and microbiomes. *Environmental Technology and Innovation*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103900>
- Zulfadillah Intan, D., Yuniati, R., & Lestari, R. (2023). Comparative study on Pb absorption ability of five shade plant species in industrial estate and urban forests of Bekasi, Indonesia. *Biodiversitas*, 24, 1289–1294. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240271>

LAMPIRAN

Lampiran 1: Alat yang digunakan dalam penelitian

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

No	Alat	Satuan	Jumlah	Kegunaan
1	Neraca analitik	Buah	1	Menimbang Sampel
2	Labu ukur 10 mL dan 50 mL	Buah	9	Uji C-organik dan Zn
3	Gelas beaker 100 ml	Buah	9	Uji C-organik dan Zn
4	Magnetic stirrer hotplate	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
5	Oven	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
6	Shaker	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
7	Spektrofotometri UV-VIS	Buah	1	Uji C-organik
8	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	Buah	1	Uji Zn
9	Mesin Pengayak	Buah	1	Untuk menggerakkan saringan pengayak
10	Saringan 100 Mesh	Buah	1	Menyaring sampel agar butirannya kecil.
11	Kuvet	Buah	1	Uji C-organik
12	Labu takar 250 ml	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
13	Labu takar 100 ml	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
14	bulp	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
15	Gelas Kimia 100 ml	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
16	Gelas Kimia 250 ml	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
17	Pipet skala 5 ml	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
18	Pipet skala 10 ml	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
19	Batang pengaduk	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
20	Spatula	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
21	Botol Semprot	Buah	1	Uji C-organik dan Zn
22	Polybag	Lembar	300	Penanaman semai
23	Plastik ziplock	Lembar	30	Penanaman semai
24	Sampul Kertas	Lembar	30	Penanaman semai
25	<i>Grinder</i>	Buah	1	Menghaluskan sampel tanaman
26	Bunsen	Buah	1	Mengkondisikan area pada keadaan aseptis saat subkultur
27	Laminar air flow	Buah	1	Meja steril untuk pembuatan inokulum
28	Kaca Arloji	Buah	1	Wadah untuk menimbang bahan kimia

No	Alat	Satuan	Jumlah	Kegunaan
29	Corong	Buah	9	Alat bantu untuk memindahkan cairan dengan dimensi yang lebih kecil
30	Erlenmeyer 250 mL	Buah	9	Tempat larutan
31	Kertas saring whatman no 42	Lembar	30	Untuk menyaring partikel tersuspensi dari cairan sampel

Lampiran 2: Bahan yang digunakan dalam penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

No	Bahan	satuan	jumlah	Kegunaan
1	$K_2Cr_2O_7$ 1N	ml	15	Uji C-organik
2	H_2SO_4 pa. 98%	ml	21	Uji C-organik
3	Larutan standar 5000 ppm C	ml	5	Uji C-organik
4	Larutan HNO_3	ml	30	Uji Zn
5	Larutan $HClO_4$	ml	30	Uji Zn
6	Aquades	Liter	3	Larutan pengencer dan sterilisasi alat
7	Bibit Samanea saman	Pohon	96	Tanaman Uji
8	Bibit Ochroma grandiflorum rowlee	Pohon	96	Tanaman Uji
9	Arbuscular Micoriza Fungi (AMF)	gram	960	Mikroba pendukung tanaman uji
10	Nacl	Liter	2	Mikroba pendukung tanaman uji
11	Tanah Uji	gram	750	Untuk media tanam

Lampiran 3: Analisa data uji sampel logam berat Zn

Kode	Mean Abs.	Ppm kurva Conc. (µg/ml)	Pengenceran	Konsentrasi (mg/L)	Konsentrasi ppm (mg/kg)
K 15	0,0909	0,5014	10	5,014	50,143

Rumus:

$$Zn (mg/kg) = ppm \text{ kurva} \times \frac{1000 \text{ g}}{(\text{berat sampel } g)} \times \frac{ml \text{ ekstrak}}{1000 \text{ ml}} \times \text{pengenceran}$$

Keterangan :

Ppm kurva = kadar contoh yang di dapat dari kurva regresi hubungan antara kadar deret standar dengan pembacanya setelah dikurangi blanko.

1000 = konversi ke kg

Contoh perhitungan kode K15:

$$Zn \left(\frac{mg}{kg} \right) = 0,5014 \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ g}} \times \frac{10 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times 10 = 50,143 \text{ mg/kg}$$

Lampiran 4: Analisa data uji sampel C-organik

Kode Tanah	Mean Abs.	Conc. (µg/ml)	Kadar (%)	Rerata (%)
Awal	0,195	99,0611	0,99	0,99

Rumus:

$$C (\%) = ppm \text{ kurva} \times \frac{100}{(\text{berat sampel } mg)} \times \frac{ml \text{ ekstrak}}{1000 \text{ ml}}$$

Keterangan:

Ppm kurva = kadar contoh yang di dapat dari kurva regresi hubungan antara kadar deret standar dengan pembacanya setelah dikurangi blanko.

100 = konversi ke %

Contoh perhitungan:

$$C (\%) = 99,0611 \times \frac{100}{(1000 \text{ mg})} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0,99\%$$

Lampiran 5: Analisa data karakter serapan logam pada tanaman
Konsentrasi Zn di tanah awal 145, 61 mg/kg

Kode	Tanah (mg/kg)	Akar (mg/kg)	Batang (mg/kg)
Kontrol 3	55,58	46,92	40,82

a. Faktor transport

$$TF = \frac{\text{Konsentrasi logam dalam tajuk tanaman } \left(\frac{mg}{kg}\right)}{\text{Konsentrasi logam dalam akar tanaman } \left(\frac{mg}{kg}\right)}$$

$$TF = \frac{40,82 \left(\frac{mg}{kg}\right)}{46,92 \left(\frac{mg}{kg}\right)} = 0,87$$

b. Faktor Biokonsentrasi (BCF)

$$BCF = \frac{\text{Konsentrasi logam dalam akar dan batang tanaman } \left(\frac{mg}{kg}\right)}{\text{Konsentrasi logam dalam tanah } \left(\frac{mg}{kg}\right)}$$

$$BCF = \frac{46,92 + 40,82 \left(\frac{mg}{kg}\right)}{55,58 \left(\frac{mg}{kg}\right)} = 1,58$$

c. Efisiensi Penyisihan

$$\text{Efisiensi penyisihan } (\%) = \frac{C \text{ awal media } \left(\frac{mg}{kg}\right) - C \text{ akhir media } \left(\frac{mg}{kg}\right)}{C \text{ awal media } \left(\frac{mg}{kg}\right)}$$

$$\text{Efisiensi penyisihan } (\%) = \frac{145,61 \text{ mg/kg} - 55,58 \text{ mg/kg}}{145,61 \text{ mg/kg}} = 0,61 = 61 \%$$