

Studi Fitoremediasi Merkuri Pada *Tailing* Amalgamasi Penambangan Emas Rakyat Menggunakan Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* L.)

Nurmaya Arofah^{1*}, A. Silvan Erusani², Fabika Azahra³

^{1,2}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jl. Ir. H. Djuanda No. 95, Ciputat, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

³ Mahasiswa Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jl. Ir. H. Djuanda No. 95, Ciputat, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

Koresponden E-mail: nurmayaarofah@uinjkt.ac.id

(Diterima: 5 Maret 2023 | Disetujui: 30 Januari 2024 | Diterbitkan: 31 Januari 2024)

Abstract: Heavy metal pollution in the soil has become a global problem along with the industrialization process, mining, and laboratory activities, as well as daily activities. Artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities using amalgamation methods have the potential to pollute the environment because they produce tailings with mercury (Hg) metal content, which causes various environmental problems even though they are in very low concentrations. The purpose of this study was to determine the characteristics of tailings polluted with Hg metal, determine Hg levels in soils that have been absorbed by *Vetiveria zizanioides*, determine the effect of compost addition on soil quality improvement, and determine the factor of mercury transfer from soil to plants. The results showed that the mercury concentration in amalgamation tailings of 201.6 mg/kg may decrease after 28 days of remediation to 13.72 mg/kg at TTG1, 170.73 mg/kg at TTG2, and 53.4 mg/kg at TTG3. The ability of *Vetiveria zizanioides* L. to absorb mercury in amalgamated tailings without adding compost can be seen from the TTG₁ transfer factor value of 9.69.

Keywords : artisanal and small scale gold mining; mercury; phytoremediation; *vetiveria zizanioides*

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat di dalam tanah sudah menjadi masalah global seiring meningkatnya proses industrialisasi, aktivitas pertambangan dan laboratorium maupun kegiatan sehari-hari. Logam berat memiliki efek merugikan dalam lingkungan meskipun dalam konsentrasi yang sangat rendah. Logam berat sangat sulit terdegradasi di alam dan sangat mudah berikatan dengan molekul lain yang dapat mengganggu atau merusak fungsi dari suatu enzim atau logam esensial lainnya (Palar, 2008).

Area sekitar tambang emas adalah salah satu yang paling sering ditemukan sebagai lingkungan kritis yang terkontaminasi logam berat. Lingkungan yang rusak karena kegiatan tambang emas meningkat secara berlebihan. Tanah yang terkontaminasi merkuri dapat disebabkan oleh kegiatan tambang skala kecil yang dikelola oleh rakyat atau dikenal dengan istilah penambangan emas rakyat seperti di Pandeglang. Metode pengolahan tambang emas yang dilakukan oleh penambang rakyat adalah metode amalgamasi menggunakan logam merkuri. Penambang skala kecil menggunakan logam merkuri dalam jumlah yang besar untuk mengekstraksi emas dari tanah yang mengandung bijih emas. Metode amalgamasi berpotensi mencemari lingkungan, karena menghasilkan *tailing* dengan kandungan

logam merkuri yang menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan seperti pencemaran pada air, tanah dan udara serta berdampak kepada makhluk hidup (Mantey *et al.*, 2020).

Merkuri umumnya tersedia secara hayati dan memasuki rantai makanan sebagai metilmerkuri (MeHg). Namun, bentuk alami merkuri yang sering dikeluarkan dari kawasan industri adalah merkuri anorganik, ion merkuri (II), dan merkuri unsur. Unsur merkuri (Hg⁰) terdapat dalam bentuk cairan volatil dari fluks tanah-udara dan pelepasan antropogenik lainnya yang dapat tetap tersuspensi di atmosfer selama satu hingga dua tahun. Ini dapat dikonversi ke Hg²⁺ melalui oksidasi dan akhirnya akan berada di sumber air atau tanah melalui hujan. Hg²⁺ ini kemudian akan diubah menjadi metilmerkuri melalui proses metilasi oleh bakteri reduksi sulfur anaerob (Eckley *et al.*, 2015; Eckley *et al.*, 2013; Nurfatini & Amir, 2018).

Pemerintah Republik Indonesia berkomitmen untuk mengurangi dan menghilangkan pencemaran merkuri dengan terbitnya Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2017 tentang ratifikasi Konvensi Minamata tentang Merkuri. Tujuannya adalah untuk menghentikan penggunaan merkuri dalam pertambangan emas skala kecil dan memperkuat kemampuan daerah untuk memecahkan masalah pencemaran merkuri dari pertambangan emas skala

kecil. Pendekatan yang dilakukan meliputi pencarian alternatif teknik pengolahan merkuri (Sekretariat Negara, 2017).

Fitoremediasi (*Phytoremediation*) merupakan teknik pemulihan lahan tercemar menggunakan tumbuhan untuk menyerap, mendegradasi, mentransformasi dan mengimobilisasi bahan pencemar, baik itu logam berat maupun senyawa organik. Beberapa tanaman mampu menyerap sejumlah besar logam. Saat ini walaupun teknologi fitoremediasi belum banyak diaplikasikan dalam pemulihan pencemaran tanah dan udara, ke depan diharapkan akan menjadi teknologi pembersih lingkungan yang potensial dan didorong dengan keanekaragaman hayati tanaman di Indonesia, sehingga program pembangunan yang berkelanjutan (*sustainable development*) dapat tercapai. Fitoremediasi tanaman lebih unggul karena tanaman lebih tahan lama dibandingkan mikroorganisme pada kontaminan yang cukup tinggi dan mampu menyerap toksisitas logam berat jauh lebih praktis tanpa merusak pertumbuhan dari tanaman (Irawanto, 2010).

Menurut Hidayati *et al.* (2009), area bekas pengolahan tambang rakyat saat ini ditumbuhi berbagai macam tanaman seperti *Lindernia crustacea* (L.) F.M., *Zingiber* sp. *Lindernia crustacea* (L.) F.M dan tanaman lainnya yang belum diketahui dan toleran terhadap merkuri.

Tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) merupakan tanaman akumulator logam yang memiliki sifat daya penyerapan atau akumulasi yang tinggi terhadap logam berat di jaringan tumbuhan (Rifaldi *et al.*, 2022). Menurut Mangkoedihardjo dan Triastuti (2011), tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) memiliki kemampuan dalam menyerap logam merkuri pada lahan eks TPA Keputih Surabaya, hasilnya tanaman tersebut dapat menurunkan kadar merkuri dalam tanah 6 mg/kg menjadi 0,698 mg/kg untuk media 100% tanah tercemar. Penelitian Rifaldi *et al.* (2022), menunjukkan akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) mengakumulasi logam merkuri dari tanah tercemar limbah *tailing* emas lebih banyak daripada tanaman bunga matahari, yaitu sebesar 0,0099 mg/kg. Upaya meningkatkan akumulasi logam berat pada tanaman dapat dilakukan dengan menggunakan kompos karena dapat mengikat kelebihan logam berat yang bersifat racun. Jika dibandingkan dengan kontrol (tanpa kompos), penambahan kompos pada akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) dengan dosis 1,25 kg per polybag secara signifikan meningkatkan penyerapan emas (Au) pada akar tanaman sebesar 39% (Prawira *et al.*, 2018).

Kemampuan tanaman dalam meremediasi tanah dapat dilihat dari nilai faktor transfer, dimana nilai faktor transfer yang lebih besar dari satu menunjukkan tanaman mempunyai kemampuan sebagai tanaman fitoremediasi dan sebaliknya jika

besarnya kurang dari satu. Menurut Ng *et al.* (2019), akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) memiliki nilai faktor transfer lebih dari satu terhadap logam Cd, Cu dan Zn. Fitoremediasi oleh tanaman pangan akan lebih berbahaya bagi manusia karena logam berat yang masuk ke dalam tubuh manusia dapat membahayakan tubuh dan menyebabkan toksisitas kronis sehingga dapat merusak fungsi organ hati, ginjal, dan kerapuhan tulang (Ratnawati & Fatmasari, 2018). Oleh karena itu, pada penelitian ini dipilih tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) sebagai tanaman remediator *tailing* penambangan emas rakyat di Pandeglang karena mudah untuk tumbuh dan beradaptasi sehingga lebih ekonomis untuk diimplementasikan di lapangan, selain itu tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) bukan tanaman yang menjadi sumber pangan di kalangan masyarakat, sehingga dapat menjadi solusi alternatif dalam meminimalisir dan menjadi bahan rekomendasi untuk jenis tanaman yang berpotensi menyerap merkuri dari tanah yang tercemar. Kajian penanggulangan pencemaran logam berat di tanah tercemar *tailing* amalgamasi sangat dibutuhkan di Indonesia khususnya di Pandeglang karena terdapat banyak kegiatan penambangan emas rakyat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi *tailing* amalgamasi pada tanah sebelum dan saat remediasi selama 28 hari dengan 3 perlakuan media tanam yaitu *tailing* amalgamasi dan penambahan kompos, menentukan konsentrasi tanaman pada hari ke 28 serta mengetahui kemampuan tanaman dalam menyerap merkuri berdasarkan nilai faktor transfer.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah dua jenis limbah tanah *tailing* yang diambil dari bekas kawasan pengolahan emas rakyat Pongkor, tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.), larutan HgCl₂, larutan HNO₃, KI, CuCl₂.2H₂O, Na₂SO₃.7H₂O, larutan NaHCO₃ 8%, K₂S₂O₈, HNO₃ pekat, KMnO₄, SnCl₂, asam tartarat 5%, Na₂CO₃ 8%, dan asam pikrat 1%.

Alat yang digunakan terdiri dari sekop *stainless steel* (Cricton), wadah *sample*, pot tanaman, *ice box* (Giant), saringan alat – alat gelas, kertas saring *Whatman* no.42, oven (Memmert Oven Un 55 531), pipa PVC (Wavin), *Generator Continous Flow Hydrid System Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrophotometer* (ICP - OES) Uap Dingin (5800 Agilent), dan spektrometer UV-VIS (Shimadzu UV 1800).

Prosedur Penelitian

Penelitian uji fitoremediasi ini akan dilakukan dengan mengambil sampel *tailing* dari kegiatan penambangan emas rakyat di Pandeglang dan

melakukan proses remediasi sampel tanah dengan menggunakan tanaman *Vetiveria zizanioides L.*

Persiapan Remediasi (Patandangan *et al.*, 2016)

Penanaman tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides L.*) dilakukan pada media tanam yaitu tanah *tailing* amalgamasi yang mengandung logam merkuri (Hg) dengan total sebanyak 4 kg. Proses fitoremediasi dilakukan dengan berbagai perlakuan yang dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1. Data Perlakuan Sampel Uji Fitoremediasi Menggunakan *Vetiveria zizanioides L*

No	Kode Sampel	Keterangan
1.	TTG ₀	Tanah <i>tailing</i> amalgamasi 100% tanpa tanaman
2.	TTG ₁	Tanah <i>tailing</i> amalgamasi 100% sebanyak 4 kg + tanaman
3.	TTG ₂	Campuran tanah <i>tailing</i> amalgamasi 3 kg dan kompos 1 kg + tanaman
4.	TTG ₃	Campuran tanah <i>tailing</i> amalgamasi 1 kg dan kompos 3 kg + tanaman

Pengamatan Morfologi Tanaman Fitoremediasi (Lona *et al.*, 2015)

Morfologi tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides L.*) yang sudah ditanam pada media tanam tersebut diamati setiap hari selama 28 hari. Parameter morfologi tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides L.*) yang diamati antara lain jumlah batang dan daun (helai), tinggi tanaman (cm), dan warna daun serta diamati kondisi pH dan suhu media tanam. Pengambilan sampel tanaman pucuk dan akar dilakukan pada hari ke-28 untuk dianalisis kadar merkuri (Hg) menggunakan ICP OES.

Pengambilan Sampel Tanah pada Proses Remediasi (Ratnawati & Faizah, 2020)

Sampel tanah *tailing* tercemar yang sudah ditanami akar wangi (*Vetiveria zizanioides L.*) diambil setiap 7 hari selama 28 hari (7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari) . Pengambilan sampel menggunakan pipa besi kecil yang berlubang dan sendok/spatula. Pipa ditancapkan ke dalam tanah, setelah itu ditarik keluar, tanah yang berada di pipa tersebut dimasukkan ke dalam wadah sampel.

Analisis Kadar Merkuri pada Tanah dan Tanaman

Sampel tanah yang telah diambil pada hari ke 7,14,21 dan 28, serta daun dan akar yang telah diambil pada hari ke 28 dianalisis kadar merkurnya menggunakan ICP OES. Berat sampel yang diambil untuk analisis kadar merkuri (Hg) sebanyak 50 gram.

Menentukan Nilai Faktor Transfer (Yulianti, 2021)

Faktor transfer tanah-tanaman (FT) didefinisikan sebagai rasio antara konsentrasi total logam dalam tanaman dan konsentrasi total logam yang sama dalam tanah. Nilai faktor transfer

digunakan untuk menentukan kemampuan *Vetiveria zizanioides* dalam remediasi tanah tercemar logam merkuri, dimana nilai faktor transfer yang lebih besar dari satu menandakan *Vetiveria zizanioides* mempunyai kemampuan sebagai tanaman fitoremediasi.

$$FT = \frac{\text{konsentrasi Hg pada tanaman (mg/kg)}}{\text{konsentrasi Hg pada tanah (mg/kg)}} \quad (1)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampling Tailing pada Pengolahan Emas Rakyat

Pada penelitian ini, sampel *tailing* yang digunakan berasal dari *tailing* pengolahan emas rakyat. Kegiatan pengolahan emas rakyat di Kabupaten XYZ dilakukan oleh hampir semua warga masyarakat. Setiap rumah memiliki alat untuk megolah yaitu tromol/glundungan. Glundungan adalah wadah dengan diameter tertentu, yang digunakan untuk memisahkan emas dengan menggunakan logam merkuri dilakukan selama 1 hari 1 malam. Mineral emas hasil tambang tersebut kemudian dilakukan proses pemisahan menggunakan metode amalgamasi menggunakan logam merkuri. Sebanyak 10 kg bahan baku (5 buah amalgamasi) membutuhkan 1 kg merkuri untuk memisahkannya. Proses amalgamasi dilakukan selama satu malam, emasnya dipisahkan, hasil samping proses gundungan atau *tailing* amalgamasi dibuang atau lanjut ke tahap proses sianidasi. Proses Sianida dilakukan menggunakan campuran sianida dan aqua regia yaitu campuran asam-asam kuat seperti HNO₃, H₂SO₄ yang memiliki sifat korosifitas yang sangat tinggi. Setelah emas dipisahkan menggunakan proses sianida, selanjutnya *tailing* hasil samping proses dibuang pada lahan sekitar tempat pengolahan. *Tailing* hasil samping proses pengolahan emas dengan amalgamasi digunakan sebagai bahan penelitian ini karena metode amalgamasi dilakukan oleh semua masyarakat yang melakukan pengolahan emas. Pengambilan *tailing* menggunakan sekop kemudian dimasukkan ke dalam wadah, kemudian *tailing* tersebut digunakan sebagai media tanam tanaman akar wangi.

Kondisi Tanah dan Tanaman Saat Fitoremediasi

Kondisi tanah dan tanaman yang diamati saat fitoremediasi yaitu pada tanah adalah pH dan suhu media tanam, sedangkan pada tanaman adalah morfologinya seperti warna dan jumlah daun. Salah satu parameter kualitas tanah yang penting yaitu derajat keasaman (pH) tanah yang dapat mempengaruhi pertumbuhan suatu tanaman (Meilianto *et al.*, 2022). Media tanam pada penelitian ini yang digunakan untuk pertumbuhan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides L.*) yaitu tanah *tailing* amalgamasi hasil dari limbah kegiatan penambangan emas yang mengandung logam merkuri (Hg) diamati selama 28 hari.

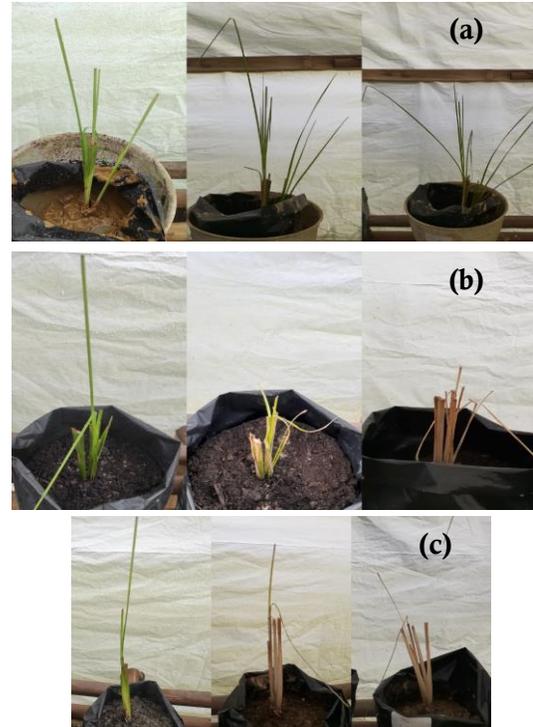
Tabel 2. Data pengamatan pH dan suhu media tanam selama 28 hari

No	Perlakuan	pH				Suhu (°C)			
		Minggu ke-				Minggu ke-			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1.	TTG ₁	5,571	5,58	6,43	7	29	29,9	31,6	32,29
2.	TTG ₂	4,167	4,5	5	5,21	29,43	30,7	32,1	32,57
3.	TTG ₃	5,143	5	5,21	5	29,71	31	33	32,71

Tabel 2 menjelaskan tentang data pengamatan pH dan suhu media tanam untuk pertumbuhan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) per-7 hari selama 28 hari pengamatan. Sampel tanah *tailing* amalgamasi 100% sendiri yang tanpa ditanami oleh tanaman akar wangi (TTG₀) memiliki pH tanah sebesar 6 dengan suhu 29°C. Jika dilihat dari Tabel 2 media tanam perlakuan sampel TTG₁ dan TTG₂ memiliki hasil peningkatan nilai pH tanah per-7 hari selama 28 hari pengamatan, sedangkan media tanam perlakuan sampel TTG₃ mengalami naik turun per-7 hari selama 28 hari pengamatan.

Media tanam dengan penambahan kompos memiliki nilai pH yang asam dibandingkan dengan media tanam yang 100% tanah tercemar tanpa adanya kompos sehingga terjadi penurunan nilai pH tanah dari media tanam dengan perlakuan sampel TTG₀. Hal ini dikarenakan kompos yang digunakan untuk media tanam bersifat asam sehingga dapat menurunkan nilai pH tanah *tailing* menjadi lebih asam. Penggunaan kompos atau pupuk dalam jangka panjang dan terus menerus dapat membuat tanah menjadi masam. Pupuk-pupuk anorganik yang mengandung asam kuat seperti asam klorida (HCl), asam nitrat (HNO₃), dan asam sulfat (H₂SO₄) bereaksi dengan sisa basa lemah seperti ammonium hidroksida (NH₄OH) akan menghasilkan kelebihan asam dan menghidrolisis air menjadi ion H⁺. Contohnya yaitu ammonium sulfat, ammonium klorida, atau ammonium nitrat. Jika pupuk-pupuk berupa garam sisa basa kuat dan asam lemah maka tanah menjadi basa, misalnya kalsit (CaCO₃) atau batu kapur (Karamina *et al.*, 2017).

Suhu rata-rata media tanam selama 28 hari penelitian berkisar antara 29-33°C. Suhu optimum untuk pertumbuhan tanaman akar wangi yaitu 17-27°C. Akar wangi dikenal sebagai tanaman yang mudah untuk tumbuh dan beradaptasi dalam kondisi yang ekstrem, sehingga masih dapat tumbuh dan bertahan dikisaran suhu -14°C hingga 55°C (Priherdityo *et al.*, 2016). Suhu rata-rata media tanam tidak memasuki kisaran suhu optimum untuk pertumbuhan akar wangi, tetapi besarnya tidak terlalu jauh dari suhu optimum dan masih masuk dalam kisaran suhu yang dapat ditolerir oleh akar wangi untuk tetap mengalami pertumbuhan. Pada perlakuan TTG₃ suhu media tanam lebih tinggi daripada TTG₁ dan TTG₂. Menurut Winata (2018), hal tersebut disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme yang meningkat karena penambahan kompos yang lebih banyak dibandingkan dengan perlakuan lainnya

**Gambar 1.** Pertumbuhan tanaman selama 28 hari remediasi, (a) TTG₁, (b) TTG₂, (c) TTG₃

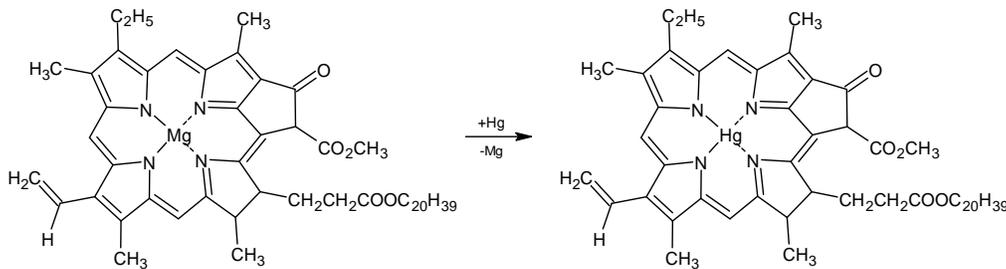
Tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) akan tumbuh dengan baik jika derajat keasaman (pH) tanah sekitar 6 – 7 dan dapat bertahan pada pH sekitar 3,3-9,5. Kisaran pH yang optimum untuk tanaman membantu mencegah infeksi bakteri pada akar selain memasok nitrogen dalam media tanam, yang pada akhirnya dapat mengakibatkan peningkatan hasil panen (Chen *et al.*, 2021; Priherdityo *et al.*, 2016; Rostwentiwaivi & Rellykur, 2018).

Media tanam perlakuan sampel TTG₁ setelah pengamatan selama 28 hari memiliki nilai pH tanah yang tergolong kedalam kisaran pH optimum tanah untuk pertumbuhan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.). Hal tersebut dibuktikan oleh tanaman akar wangi yang dihasilkan dapat tumbuh tinggi, dan warna batang daun tetap berwarna hijau muda. Selain itu, tanaman memiliki jumlah helai daun yang banyak yaitu pada awal remediasi banyaknya 14 lalu menjadi 22 helai pada akhir remediasi. Media tanam perlakuan sampel TTG₂ dan TTG₃ mempunyai rata-rata nilai pH tanah yang cenderung lebih asam dari kisaran pH optimum tanah untuk pertumbuhan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.). Hal

tersebut dibuktikan oleh tanaman akar wangi yang diperoleh tidak bertambah tinggi dan warna batang daun berwarna kuning dan coklat. Selain itu, tanaman memiliki memiliki jumlah helai daun yang sedikit meskipun terdapat penambahan sedikit jumlah helai daun yaitu pada awal remediasi TTG₂ memiliki 4 helai daun lalu jumlahnya menjadi 7 helai, sedangkan pada TTG₃ memiliki 12 helai daun lalu menjadi 13 helai daun.

Perubahan daun pada tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides L.*) menjadi mengering hingga warna kuning dan coklat seperti pada Gambar 1 dapat menunjukkan bahwa tanaman telah menyerap merkuri dari tanah. Unsur Mg yang merupakan unsur hara makro penyusun molekul klorofil daun telah tergantikan oleh merkuri (Hg) sehingga konsentrasi merkuri (Hg) meningkat sementara kadar klorofil

menurun. Unsur Mg ini mudah digantikan dengan kation lainnya, sehingga jumlah kecil logam berat yang terserap dapat dengan mudah menggantikan Mg dalam klorofil. Struktur kloroplas sangat bergantung oleh nutrisi seperti magnesium, sehingga ketika konsentrasi merkuri (Hg) semakin meningkat sebaliknya asupan nutrisi magnesium akan berkurang yang mengakibatkan terjadi kerusakan pada struktur kloroplas. Rusaknya struktur kloroplas menyebabkan zat hijau pada batang dan daun mengalami klorosis, menguning, dan kehilangan warna hijaunya. Gambar 2 menunjukkan interaksi klorofil dengan merkuri (Hg) yang dapat mempengaruhi nutrisi seperti magnesium (Mg) sehingga terjadi perubahan warna daun (Borolla, Mariwy, & Manuhutu, 2019; Kilikily, Mariwy, & Sunarti, 2020).

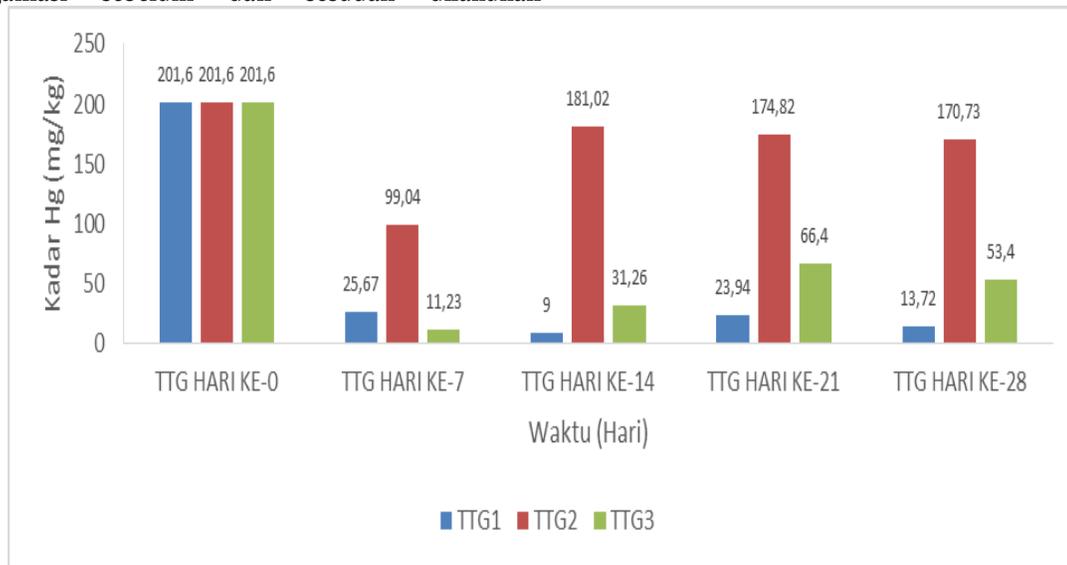


Gambar 2. Reaksi klorofil dengan merkuri (Kilikily *et al.*, 2020)

Konsentrasi Merkuri (Hg) pada Tanah Tailing Amalgamasi dan Tanaman

Konsentrasi merkuri (Hg) pada tanah *tailing* amalgamasi sebelum dan sesudah dilakukan

fitoremediasi dengan tanaman akar wangi selama 28 hari disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik konsentrasi merkuri (Hg) pada tanah *tailing* amalgamasi per-7 hari selama 28 hari remediasi

Berdasarkan Gambar 3 diketahui bahwa konsentrasi merkuri pada tanah menurun setelah dilakukan fitoremediasi menggunakan tanaman akar wangi, dimana konsentrasi merkuri sebelum remediasi sebesar 201,6 mg/kg dan setelah 28 hari remediasi menjadi 13,72 mg/kg pada TTG₁; 170,73

mg/kg pada TTG₂ dan 53,4 mg/kg pada TTG₃. Hasil analisis konsentrasi merkuri pada media tanam tanah *tailing* amalgamasi per-7 hari selama 28 hari pengamatan mengalami fluktuasi dan konsentrasi paling kecil setelah dilakukan fitoremediasi terjadi pada media tanam tanpa penambahan kompos.

Konsentrasi logam berat merkuri yang menurun jumlahnya dalam tanah dapat disebabkan oleh transfer logam melalui difusi dan osmosis, dimana terjadi pemindahan massa materi pada media dengan konsentrasi tinggi (tanah) ke konsentrasi rendah (tanaman). Pada minggu pertama terjadi penurunan konsentrasi merkuri pada tanah dengan jumlah yang paling banyak dibandingkan minggu lainnya, ini dikarenakan proses transfer logam dan kemampuan serapan merkuri yang dilakukan oleh tanaman. Terdapat perbedaan yang cukup besar antara kedua media tersebut karena logam berat dalam tanah memiliki nilai yang tinggi selama minggu pertama sementara memiliki nilai yang rendah pada tanaman. Akibatnya, tanaman dapat menyerap logam berat dari tanah secara maksimal pada minggu pertama. Penyerapan lebih rendah dari minggu kedua hingga keempat karena adanya lebih banyak logam pada tanaman, atau dapat dikatakan bahwa toksisitas tanaman meningkat (Ratnawati & Fatmasari, 2018).

Meningkatnya toksisitas tanaman membuat tanaman mengalami gejala klorosis dan nekrosis yang dapat mempengaruhi proses fisiologis sehingga terjadi eksudat akar yang merupakan keluarnya isi sel yang dilakukan tanaman untuk menarik organisme tanah sekitar perakaran yang dapat membantu proses fitoremediasi. Proses eksudat akar ini membuat merkuri kembali dilepaskan oleh tanaman dan terendapkan dalam tanah sehingga konsentrasi merkuri pada tanah menjadi meningkat (Kilikily *et al.*, 2020).

Penurunan konsentrasi pada tanah dapat terjadi kembali, berkaitan dengan kemampuan tanaman dalam mengurangi toksisitas atau toleransi terhadap logam berat (Patandungun *et al.*, 2016). Tanaman akar wangi melakukan toleransi terhadap logam berat dengan meningkatkan sintesis fitokelatin. Jika tanaman tidak menghasilkan fitokelatin, maka akan mengakibatkan kematian. Fitokelatin bekerja membentuk senyawa kompleks dengan logam berat

dalam tubuh tanaman lalu mengangkutnya ke sel dengan cara transport aktif dan berfungsi sebagai detoksifikasi tanaman dari logam berat. Fitokelatin berikatan dengan Hg dan membentuk hubungan sulfida pada ujung sulfur pada sistein sehingga tanaman toleransi terhadap logam berat dan dapat bertahan hidup serta kembali menyerap logam merkuri pada tanah (Mariwy *et al.*, 2020; Patandungun *et al.*, 2016; Raya & Rahmah, 2012).

Konsentrasi merkuri pada tanah *tailing* amalgamasi yang melebihi baku mutu sangatlah berbahaya. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, konsentrasi merkuri pada limbah yang besarnya melebihi 0,3 mg/L diidentifikasi sebagai limbah B3 kategori 1 yaitu limbah yang memberikan dampak kepada manusia secara akut dan langsung, selain itu juga berefek negatif terhadap lingkungan hidup. Tanah sebelum dan sesudah fitoremediasi pada penelitian ini memiliki jumlah merkuri yang besarnya melebihi baku mutu tersebut, tetapi jumlahnya berkurang cukup banyak setelah dilakukan fitoremediasi karena telah diserap oleh tanaman. Jumlah merkuri yang sangat tinggi pada tanah sebelum dilakukan fitoremediasi membuat tanah masih melewati batas baku mutu. Selain itu faktor waktu pelaksanaan remediasi juga dapat mempengaruhi hal tersebut.

Mekanisme yang umum terjadi dalam akumulasi logam berat oleh tanaman yaitu akar menyerap logam dari tanah, logam ditranslokasikan ke bagian tanaman lain dan adaptasi logam di daerah sel tertentu untuk mencegah gangguan terhadap metabolisme tanaman. Hal tersebut memungkinkan tanaman untuk menyerap logam merkuri. Konsentrasi merkuri (Hg) yang diserap oleh tanaman akar wangi selama 28 hari fitoremediasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konsentrasi merkuri (hg) pada tanah dan tanaman akar wangi pada hari ke-28

Perlakuan	Konsentrasi Hg (mg/kg)		
	Akar	Daun	Tanah
TTG ₁	131,32	1,68	13,72
TTG ₂	210,87	2,33	170,73
TTG ₃	2,94	2,46	53,4

Total akumulasi dalam tanaman paling besar terdapat pada perlakuan TTG₂ yaitu sebesar 213,2 mg/kg, diikuti oleh TTG₁ sebesar 133 mg/kg lalu yang paling sedikit pada TTG₃ sebesar 5,4 mg/kg. Meskipun terdapat jumlah banyak merkuri pada tanaman TTG₂, media tanamnya memiliki konsentrasi merkuri paling besar daripada perlakuan lainnya. Hal ini dapat dipengaruhi oleh sifat merkuri yang mudah menguap ke udara, maka merkuri dari tanah dan sisa air maupun yang telah terserap oleh

tanaman dapat dikeluarkan dalam bentuk uap cair dan dengan kondisi penelitian di rumah kaca yang tertutup dapat memungkinkan merkuri untuk terendapkan kembali ke dalam tanah. Berbanding terbalik dengan perlakuan lainnya yaitu TTG₁ dan TTG₃ yang terdapat sejumlah konsentrasi merkuri yang hilang. Hal tersebut dapat disebabkan oleh mekanisme penguraian merkuri yang dilakukan tanaman seperti fitodegradasi, fitovolatilasi dan fitoekstraksi. Selain itu penyiraman tanaman juga

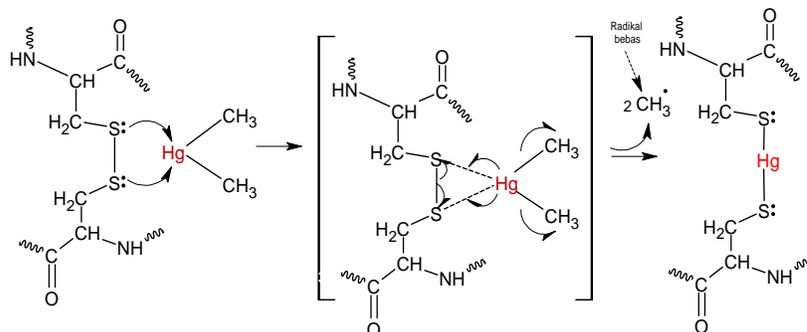
dapat menghilangkan merkuri dari tanaman karena sisa air yang tidak tertampung oleh tanaman juga turut membawa merkuri sehingga mempengaruhi konsentrasi merkuri pada tanah (Kilikily *et al.*, 2020; Zulfikah, Basir, & Isrun, 2014).

Kompos meningkatkan kualitas tanah dengan meningkatkan aktivitas mikroba, kapasitas tukar kation, kapasitas penahan kelembaban, aerasi, dan nutrisi makro dan mikro yang tersedia yang penting untuk pertumbuhan tanaman (Dadashi *et al.*, 2019). Hal tersebut ditandai dengan hasil analisis pada perlakuan TTG₃, dimana tanaman hanya sedikit menyerap merkuri dan terdapat sisa merkuri yang kecil pada tanah. Selain mekanisme pengurain merkuri oleh tanaman yang dapat menjadi faktor hilangnya kadar merkuri, tanah juga dapat melakukan pengurain tersebut. Menurut Cristaldi *et al.* (2017), kehadiran alami mikroorganisme di tanah mampu mendegradasi dan menurunkan kontaminan organik dan anorganik. Pengurain oleh mikroorganisme pada tanah biasa disebut dengan rhizodegradasi. Rhizodegradasi merupakan degradasi kontaminan organik di daerah tanah yang disebut rhizosfer. Penambahan nutrisi seperti kompos ke tanah yang tercemar, akan meningkatkan kapasitas tukar kation yang meningkatkan kemampuan tanah untuk mengikat dengan logam berat, membuatnya kurang dapat diangkut dan melalui imobilisasi mikroba. Kwiatkowska-Malina (2018) dan Rong *et al.* (2020) menjelaskan bahwa penambahan bahan organik yang kaya akan asam humat dan fulvat mendukung fiksasi logam berat dalam *tailing* tambang dan mengurangi konsentrasi logam kationik yang tersedia secara hayati. Selain itu, kompos juga menetralkan keasaman *tailing* dan menghasilkan kelarutan yang lebih rendah dari sebagian besar logam berat yang ada (Ultra *et al.*, 2022).

Berdasarkan Tabel 3 dapat diketahui bahwa tanaman akar wangi dapat menyerap logam merkuri dengan akumulasi paling banyak pada bagian akar, dimana akar ialah bagian tumbuhan yang berada

dalam tanah sehingga bersinggungan langsung dengan merkuri yang mencemari tanah. Selain itu merkuri (Hg) termasuk ke dalam logam yang paling lambat tertranslokasikan ke bagian tanaman lainnya. Akar juga memiliki mekanisme untuk menghentikan translokasi logam ke daun sehingga terdapat penumpukkan logam di akar (Anugroho *et al.*, 2020). Akumulasi terbesar merkuri pada akar ini menunjukkan tanaman akar wangi mempunyai teknik fitoremediasi yang menggunakan mekanisme fitostabilisasi dalam penyerapan dan akumulasi merkuri. Pada fitostabilisasi, polutan dimobilisasi dan diakumulasi dalam sistem akar melalui penyerapan akar (Ali *et al.*, 2013).

Saat penyerapan logam oleh tanaman, **akar** menghasilkan fitokelatin yaitu protein pengatur yang bertindak sebagai zat pengikat (kelat). Menurut Arisusanti dan Purwani (2013), fitokelatin merupakan peptida dengan 2-8 asam amino sistein sebagai komponen sentralnya dan asam glutamate serta glisin di ujungnya yang berlawanan. Jika tanaman tidak menghasilkan fitokelatin, maka akan mengakibatkan kematian. Fitokelatin bekerja membentuk senyawa kompleks dengan logam berat dalam tubuh tanaman lalu mengangkutnya ke sel dengan cara transport aktif dan berfungsi sebagai detoksifikasi tanaman dari logam berat. Supaya mencapai permukaan sel, fitokelatin pertama-tama berkembang di dalam nukleus dan kemudian bergerak melalui retikulum endoplasma, alat golgi, dan vasicula sekretori. Hg diangkut atau ditranslokasikan ke jaringan tanaman melalui jaringan transportasi, terutama xilem dan floem, dengan cara fitokelatin berikatan dengan Hg dan membentuk hubungan sulfida pada ujung sulfur pada sistein sehingga terbentuk senyawa kompleks seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 (Mariwy *et al.*, 2020).



Gambar 4. Reaksi fitokelatin berikatan dengan merkuri (Hg) (Kilikily *et al.*, 2020)

Ketika logam ditranslokasikan ke bagian lain tanaman, konsentrasi pada akar menurun dan terakumulasi pada bagian daun (Mariwy *et al.*, 2020; Zulfikah *et al.*, 2014). Logam dapat memasuki sel dan menempel pada enzim katalitik, menyebabkan reaksi

kimia terganggu dalam sel sebagai akibat dari interaksi merkuri dengan gugus sulfhidril (-SH), yang merupakan sisi aktif enzim. Akibatnya, tumbuhan dapat mengalami kondisi yang menyebabkan nekrosis dan klorosis pada jaringan epidermis spons dan

pelipase, seperti yang dialami oleh perlakuan TTG₂ dan TTG₃ (Arisusanti & Purwani, 2013).

Penyerapan logam oleh tanaman juga dapat dilakukan oleh daun melalui stomata dengan proses adsorpsi dimana terjadi interaksi kohesi (tarik-menarik) antara jaringan daun luar dengan logam yang terdapat di lingkungan (Mariwy *et al.*, 2020). Menurut Puspita *et al.* (2014) akar, daun, dan stomata hanyalah beberapa organ di mana proses penyerapan mungkin terjadi.

Melalui membran sel mereka, tanaman dapat mengambil ion dari lingkungannya. Karena karakteristik ini, tanaman dapat mengakumulasi

logam berat hingga konsentrasi tertentu atau bahkan meningkatkan jumlah ion logam dalam medium.

Efektivitas pembersihan cemaran merkuri pada tanah atau fitoremediasi menggunakan tanaman akar wangi ini dapat diketahui dari nilai faktor transfer. Nilai faktor transfer digunakan untuk menentukan kemampuan tanaman akar wangi dalam remediasi tanah tercemar logam merkuri, dimana nilai faktor transfer yang lebih besar dari 1 menandakan tanaman akar wangi merupakan tanaman akumulator merkuri yang efisien dalam menyerap dan mengakumulasi merkuri dari tanah *tailing* amalgamasi (Kriti *et al.*, 2021; Yulianti, 2021). Hasil nilai faktor transfer tanaman akar wangi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Faktor transfer tanaman akar wangi

Perlakuan	Konsentrasi Hg (mg/kg)		Faktor Transfer (FT)
	Tanaman	Tanah	
TTG ₁	133	13,72	9,69
TTG ₂	213,2	170,73	1,25
TTG ₃	5,4	53,4	9,44

Berdasarkan Tabel 4 diketahui nilai faktor transfer pada media tanam yang murni *tailing* amalgamasi (TTG₁) menunjukkan nilai faktor transfer yang hampir mendekati satu. Ketika dilakukan penambahan kompos seperti pada TTG₂ dengan komposisi media tanam dari tanah *tailing* amalgamasi 3 kg dan kompos 1 kg, menghasilkan nilai faktor transfer yang besarnya lebih dari 1. Kemudian komposisi media tanam dibalik menjadi 1 kg *tailing* amalgamasi dan 3 kg kompos, menghasilkan nilai faktor transfer yang besarnya jauh lebih kecil dari satu. Hasil ini menunjukkan penambahan kompos dapat berpengaruh pada transfer merkuri tanah ke dalam tanaman, tetapi dibutuhkan tidak dalam jumlah yang banyak dan tidak melebihi jumlah dari *tailing*. Jika jumlahnya yang terlalu banyak seperti pada perlakuan TTG₃, tanaman menjadi tidak efektif dalam menyerap merkuri.

Peningkatan pelepasan ion H⁺ dalam tanah disebabkan karena khelasi oleh bahan organik seperti kompos yang dapat mengontrol ketersediaan logam dalam tanah. Pelepasan tersebut menghasilkan pembentukan kompleks logam untuk tanaman dan memicu akar untuk menyerap logam (Prawira *et al.*, 2018). Semakin banyak kompos yang digunakan, maka pembentukan kompleks logam akan semakin meningkat dan tanaman semakin cepat dan banyak menyerap logam. Konsentrasi logam yang terlalu tinggi diserap oleh tanaman membuat toksisitas tanaman meningkat yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan menyebabkan tanaman mati.

KESIMPULAN

Kadar merkuri pada *tailing* penambangan emas rakyat di Pandeglang sebelum remediasi sebesar 201,6 mg/kg, tanaman dapat menurunkan konsentrasi

merkuri pada *tailing* amalgamasi pada 3 perlakuan selama 28 hari untuk TTG₁, TTG₂ dan TTG₃ adalah 13,72 mg/kg, 170,73 mg/kg dan 53,4 mg/kg. Tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) memiliki kemampuan menyerap merkuri tanpa penambahan kompos dapat dilihat nilai faktor transfer TTG₁ sebesar 9,69.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian dan Penerbitan Lembaga Penelitian dan Pengabdian UIN Syarif Hidayatullah Jakarta yang telah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals - Concepts and applications. *Chemosphere*, 91.
- Anugroho, F., Kurniati, E., & Effendi, B. A. P. (2020). Potensi Fitoremediasi Tanah Tercemar Timbal (Pb) Dengan Penambahan EDTA Menggunakan Rumput Raja (*Pennisetum purpureoides*). *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 7(1), 1–8.
<https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2020.007.01.1>.
- Arisusanti, R. J., & Purwani, K. I. (2013). Pengaruh mikoriza *Glomus fasciculatum* terhadap akumulasi logam timbal (Pb) pada tanaman *Dahlia pinnata*. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 2(2).
- Borolla, S. M., Mariwy, A., & Manuhutu, J. (2019). Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Merkuri (Hg) Menggunakan Tumbuhan Kersen (*Muntingia Calabua* L) dengan Sistem Reaktor. *Molluca Journal of Chemistry Education (MJCE)*, 9(2), 78-89.

- <https://doi.org/10.30598/mjocevol9iss2pp78-89>.
- Chen, X. W., Wong, J. T. F., Wang, J. J., & Wong, M. H. (2021). Vetiver grass-microbe interactions for soil remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(9), 897–938.
- <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1738193>.
- Cristaldi, A., Conti, G. O., Jho, E. H., Zuccarello, P., Grasso, A., Copat, C., & Ferrante, M. (2017). Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology and Innovation*, 8, 309–326.
- <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.002>.
- Dadashi, S., Sepanlou, M. G., & Mirnia, S. K. (2019). Influence organic compost compounds on soil chemical and physical properties. *International Journal of Human Capital in Urban Management*, 4(1).
- Eckley, C. S., Blanchard, P., McLennan, D., Mintz, R., & Sekela, M. (2015). Soil-Air Mercury Flux near a Large Industrial Emission Source before and after Closure (Flin Flon, Manitoba, Canada). *Environmental Science & Technology*, 49(16).
- Eckley, C. S., Parsons, M. T., Mintz, R., Lapalme, M., Mazur, M., Tordon, R., ... St Louis, V. (2013). Impact of closing Canada's largest point-source of mercury emissions on local atmospheric mercury concentrations. *Environmental Science & Technology*, 47(18).
- Hidayati, N., Tit, J., & Fauzia, S. (2009). Mercury and Cyanide Contaminations in Gold Mine Environment and Possible Solution of Cleaning Up by Using Phytoextraction. *HAYATI Journal of Biosciences*, 16(3), 88–94.
- Irawanto, R. (2010). Fitoremediasi Lingkungan dalam Tanaman Bali. *UPT Balai Konserasi Tumbuhan Kebun Raya Purwodadi-LIPI*, 2(4), 29–35.
- Karamina, H., Fikrinda, W., & Murti, A. T. (2017). Kompleksitas pengaruh temperatur dan kelembaban tanah terhadap nilai pH tanah di perkebunan jambu biji varietas kristal (*Psidium guajava* l.) Bumiaji, Kota Batu. *Kultivasi*, 16(3), 430–434.
- Kilikily, D., Mariwy, A., & Sunarti. (2020). Studi Akumulasi Logam Berat Merkuri (Hg) oleh Tanaman Trembesi (*Samanea saman*). *Science Map Journal*, 2(2), 85–89.
- Kriti, Basant, N., Singh, J., Kumari, B., Sinam, G., Gautam, A., Mallick, S. (2021). Nickel and cadmium phytoextraction efficiencies of vetiver and lemongrass grown on Ni–Cd battery waste contaminated soil: A comparative study of linear and nonlinear models. *Journal of Environmental Management*, 295(June), 113144.
- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113144>
- Kwiatkowska-Malina, J. (2018). Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. *Applied Soil Ecology*, 123.
- Lona, L. M., Linda, R., & Mukarlina. (2015). Pengaruh Logam Merkuri (Hg) Terhadap Pertumbuhan Seruni Rambat (*Wedelia trilobata* L . Hitchc). *Protobiont*, 4(3), 26–30.
- Mangkoedihardjo, S., & Triastuti, Y. (2011). Vetiver in Phytoremediation of Mercury Polluted Soil with the Addition of Compost. *Journal of Applied Sciences Research*, 7(4), 465–469.
- Mantey, J., Nyarko, K. B., Owusu-Nimo, F., Awua, K. A., Bempah, C. K., Amankwah, R. K., & Appiah-Effah, E. (2020). Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). *Heliyon*, 6(6).
- Mariwy, A., Dulanlebit, Y. H., & Yulianti, F. (2020). Studi Akumulasi Logam Berat Merkuri menggunakan Tanaman Awar-Awar (*Ficus Septica* Burm F). *Indo. J. Chem. Res*, 2020, 7(2), 159–169.
- Meilianto, W. D., Indrasari, W., & Budi, E. (2022). Karakterisasi Sensor Suhu Dan Kelembaban Tanah untuk Aplikasi Pengukuran Kualitas Tanah. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 10, 117–122.
- Ng, C. C., Boyce, A. N., Abas, M. R., Mahmood, N. Z., & Han, F. (2019). Phytoassessment of Vetiver grass enhanced with EDTA soil amendment-grown in single and mixed heavy metal-contaminated soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7).
- <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7573-2>.
- Nurfatini, B., & Amir, S. (2018). Recent Advances in Mercury Detection; Towards Enabling a Sensitive and Rapid Point-of-Check Measurement. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*, 4(1), 1–10.
- <https://doi.org/10.23937/2572-4061.1510010>
- Palar, H. (2008). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Patandangan, A., Syamsidar, H., & Aisyah. (2016). Fitoremediasi Tanaman Akar Wangi (*Vetiver zizanioides*) terhadap Tanah Tercemar Logam Kadmium (Cd) pada Lahan TPA Tamangapa Antang Makassar. *Al-Kimia*, 4(2), 8–21.
- Prawira, R., Syekhfani, & Kusumarini, N. (2018). Pengaruh Pemberian Amonium Tiosulfat dan Kompos Terhadap Serapan Emas (Au) Tanaman Akar Wangi (*Vetivera zizanioides*) pada *Tailing* Jampang Kulon Kabupaten Sukabumi Jawa Barat. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 5(2), 911–919.
- Priherdityo, E., Susanto, S., & Chadirin, Y. (2016). Pengaturan Intensitas Larutan Hara terhadap Pertumbuhan Tanaman Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) yang Dibudidayakan Secara Aeroponik. *Bul. Agrohorti*, 4(1), 104–112.
- Puspita, A. D., Santoso, A., & Yulianto, B. (2014). Studi akumulasi logam timbal (Pb) dan efeknya

- terhadap kandungan klorofil daun mangrove rhizophora mucronata. *Journal of Marine Research*, 3(1).
- Ratnawati, R., & Faizah. (2020). Phytoremediation of Mercury Contaminated Soil with The Addition of Compost. *J. Eng. Technol. Sci.*, 52(1), 66–80.
- Ratnawati, Rhenny, & Fatmasari, R. D. (2018). Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Timbal (Pb) Menggunakan Tanaman Lidah Mertua (*Sansevieria Trifasciata*) dan Jengger Ayam (*Celosia Plumosa*). *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(2), 62–69.
<https://doi.org/10.29080/alard.v3i2.333>
- Raya, I., & Rahmah, R. (2012). The Bioaccumulation of Cd (ii) Ions on *Euchema Cottoni* Seaweed Bioakumulasi Ion Cd (ii) Pada Rumpun Laut *Euchema Cottoni*. *JICoR: Journal of Indonesian Coral Reefs*, 13(2).
- Rifaldi, Isrun, & Khaliq, M. A. (2022). Fitoremediasi Tanaman Bunga Matahari (*Helianthus annuus* L.) dan Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) dalam Mengikat Logam Berat Merkuri (Hg) pada Limbah *Tailing* Tambang Emas Paboya. *E-J. Agrotekbis*, 10(3), 132–139.
- Rong, Q., Zhong, K., Huang, H., Li, C., Zhang, C., & Nong, X. (2020). Humic acid reduces the available cadmium, copper, lead, and zinc in soil and their uptake by tobacco. *Applied Sciences*, 10(3).
- Rostwentivaivi, V., & Rellykur, K. (2018). Risiko Produktivitas Akar Wangi Di Kabupaten Garut. *Jurnal Manajemen Agribisnis (Journal Of Agribusiness Management)*, 6(1), 21.
<https://doi.org/10.24843/jma.2018.v06.i01.p04>
- Sekretariat Negara, R. I. (2017). *Undang - Undang Nomor 11 Tahun 2017 Tentang Pengesahan Konvensi Minamata Tentang Mercury*. Sekretariat Negara, R. I. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Ultra, V. U., Ngwako, K. M., & Eliason, P. (2022). Physiological Responses, Growth, and Heavy Metal Accumulation of *Citronella* (*Cymbopogon nardus* Rendle) in Cu-Ni Mine *Tailings* as Affected by Soil Amendments. *Philippine Journal of Science*, 151(3), 1241–1254.
<https://doi.org/10.56899/151.03.36>
- Winata, A. Y. (2018). Fitoremediasi Tanah Tercemar Pelumas Bekas Menggunakan Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides*). *Jurnal Purifikasi*, 18(2), 97–105.
<https://doi.org/10.12962/j25983806.v18.i2.362>
- Yulianti, I. M. (2021). Potensi *Calotropis gigantea* dalam Fitoremediasi Logam Berat Timbal (Pb). *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 6(2), 120–128. <https://doi.org/10.24002/biota.v6i2.2985>
- Zulfikah, Basir, M., & Isrun. (2014). Konsentrasi Merkuri (Hg) dalam Tanah dan Jaringan tanaman Kangkung (*Ipomoea reptans*) Yang Diberikan Bokashi Kirinyu (*Chromolaena odorata* L.) pada Limbah *Tailing* Penambangan Emas Paboya Kota Palu. *E-J. Agrotekbis*, 2(6), 587–595.
-