

Kajian Penambahan EDTA Pada Fitoremediasi Logam Berat Timbal

Ulfa Nadhila dan Harmin Sulistyning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: harminsulis@gmail.com

Abstrak—Pencemaran Pb yang terjadi di dalam tanah dapat disebabkan oleh proses alam dan kegiatan antropogenik. Sumber utama polusi Pb adalah cerobong asap dari pabrik yang menggunakan bahan baku Pb, limbah dari industri penyimpanan baterai, peleburan dan ekstraksi logam dari bijih Pb, kegiatan pelapisan logam, pupuk dan pestisida, serta penggunaan Pb pada bahan aditif bensin. Pb dapat dihilangkan dengan proses fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan proses remediasi lingkungan tercemar menggunakan tumbuhan. Penggunaan agen pengkelat seperti EDTA dalam proses fitoremediasi logam berat Pb dapat membantu proses fitoekstraksi dan meningkatkan kelarutan Pb di tanah agar dapat dengan mudah diserap oleh tumbuhan. EDTA merupakan agen pengkelat yang terbukti efektif untuk Pb karena memiliki afinitas yang kuat dengan Pb.

Kata kunci—Fitoremediasi, Logam Berat Timbal, EDTA, Tanah Tercemar.

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN pembangunan, terutama di bidang industri, menghasilkan limbah yang dapat mencemari lingkungan. Sehingga diperlukan suatu cara untuk dapat meminimalkan dampak negatif yang timbul dari limbah industri terhadap lingkungan sekitar. Salah satu contoh senyawa anorganik yang terdapat dalam limbah industri adalah logam berat. Logam berat tidak dapat didegradasi secara biologis, tetapi hanya dapat dialihurukan atau dipindah tempatkan [1]. Salah satu logam berbahaya yang dihasilkan dari proses industri adalah timbal (Pb) [2]. Pb dihasilkan dari proses alam, yaitu dari erupsi gunung merapi dan antropogenik, yaitu dari industri baterai, industri kimia, dan pertambangan. Konsentrasi Pb dalam tanah dapat dikurangi melalui penanaman tumbuhan pengikat logam berat dengan proses fitoremediasi menggunakan tumbuhan hiperakumulator. Fitoremediasi adalah teknologi untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi dengan menggunakan tumbuhan [3]. Fitoremediasi juga merupakan alternatif teknologi pengolahan tanah tercemar yang ramah lingkungan dibandingkan pengolahan lainnya [4].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa senyawa *chelating agent* seperti EDTA (*ethylene diamine tetra acetic*) dapat meningkatkan ketersediaan logam dan karena hal tersebut dapat meningkatkan fitoekstraksi [5]. EDTA adalah agen pengkelat sintesis yang efisien dalam pengompleksan Pb dan dapat meningkatkan konsentrasi logam di bagian aerial tumbuhan karena memiliki afinitas yang kuat dengan Pb. EDTA dapat

bereaksi dengan ion Pb dan mempengaruhi fitoekstraksi dari logam. EDTA sering digunakan untuk meningkatkan penyerapan Pb oleh tumbuhan. Penggunaan fitoremediasi sebagai cara untuk meremediasi Pb sangat terbatas karena rendahnya bioavailabilitas Pb di tanah dan rendahnya translokasi Pb ke bagian aerial tumbuhan [5], sehingga menyebabkan proses fitoremediasi berlangsung dalam waktu yang lama. Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perlu dilakukan kajian mengenai pengaruh penambahan agen pengkelat EDTA terhadap proses fitoremediasi logam berat Pb.

II. METODE STUDI

Artikel ini bersumber dari berbagai kajian pustaka. Sumber pustaka yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah nasional dan internasional, *textbooks*, dan website resmi yang berhubungan dengan fitoremediasi menggunakan penambahan agen pengkelat EDTA.

III. LOGAM BERAT TIMBAL

Timbal (Pb) adalah salah satu logam berat yang paling sering ditemukan dalam berbagai masalah lingkungan dan merupakan subjek penelitian remediasi yang cukup besar [6]. Pb diketahui tidak memiliki fungsi biologis, tetapi beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa tumbuhan dapat mengakumulasi Pb, dan konsentrasi Pb yang terdapat pada jaringan tumbuhan secara signifikan terkait dengan kadar Pb di lingkungan. Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa konsentrasi Pb yang tinggi dalam tanah dapat dihubungkan dengan banyaknya Pb yang masuk ke jaringan tumbuhan [7]. Diantara logam berat Pb, Cd, Hg, dan As, dianggap sebagai logam berat yang paling berbahaya oleh *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, berdasarkan frekuensi munculnya, toksistas, dan potensi paparan terhadap manusia. Empat logam ini juga termasuk dalam polutan daftar prioritas oleh *United States Environmental Protection Agency* [8]. Logam berat Pb yang beracun ini memasuki sel melalui transportasi kation dengan berbagai substrat yang spesifik [9]. Pb adalah polutan yang terdapat di ekosistem darat maupun perairan. Selain karena proses alam, sumber utama polusi Pb adalah cerobong asap dari pabrik yang menggunakan bahan baku Pb, limbah dari industri penyimpanan baterai, peleburan dan ekstraksi logam dari bijih Pb, kegiatan pelapisan logam, pupuk dan pestisida, serta bahan

aditif pada bahan bakar [10]. Walaupun penggunaan Pb pada bahan bakar telah dilarang, namun larangan tersebut tidak termasuk pada kendaraan *off-road* seperti pesawat terbang, mobil balap, peralatan pertanian, dan mesin kelautan [11].

Didalam tubuh manusia, Pb berikatan dengan kelompok sulfhidril dan karboksil pada beragam protein struktural dan fungsional [12], sehingga mengubah struktur atau fungsi protein. Pb dapat mengubah fungsi metabolise secara normal dari protein [13]. Kemampuan untuk meniru kalsium berkontribusi terhadap penyimpanan Pb di dalam tulang dan berpengaruh terhadap keseimbangan tubuh.

Pertahanan yang dilakukan pertama kali oleh tumbuhan agar Pb tidak memasuki jaringan akar adalah dengan menahan Pb [14]. Akar merespon dengan cepat keberadaan Pb dengan membentuk penghalang mekanis. Di beberapa tumbuhan, terdapat sintesis dan deposisi *callose* yang berfungsi untuk menghalangi logam yang masuk, terletak diantara membran plasma dan dinding sel [15]. Penghambatan proses fotosintesis diketahui sebagai gejala toksisitas yang disebabkan oleh Pb pada tumbuhan [16]. Pb mempengaruhi serapan mineral pada tumbuhan. Paparan Pb mengurangi konsentrasi kation (Zn^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , dan Fe^{2+}) pada daun *Z. Mays* [17].

IV. FITOREMEDIASI

Fitoremediasi adalah teknologi yang digunakan pada berbagai tumbuhan untuk menurunkan, mengekstrak, menahan, dan menghentikan pergerakan kontaminan dari tanah dan air. Teknologi ini telah mendapat perhatian akhir-akhir ini karena inovatif, dan merupakan alternatif yang hemat untuk metode pengolahan di lokasi limbah berbahaya [18]. Tumbuhan dapat menyerap logam berat dalam tanah dan mengurangi efek toksiknya [19]. Keberhasilan fitoremediasi tergantung pada toleransi tumbuhan terhadap logam berat, kemampuan metabolisme dan imobilisasinya, dan juga besar biomassa tumbuhan untuk meremediasi logam berat dalam tanah [20].

A. Mekanisme Fitoremediasi

Teknik fitoremediasi bergantung pada modalitas yang berbeda, tergantung pada sifat fisik dan zat yang menyusun kontaminan dan karakteristik tumbuhan. Fitoremediasi berjalan secara alami dengan enam tahapan proses yang dilakukan tumbuhan terhadap kontaminan atau pencemar disekitarnya [21].

- 1) Fitoekstraksi (fitoakumulasi): proses ini melibatkan penyerapan kontaminan dari akar diikuti oleh translokasi dan akumulasi dibagian aerial. Teknik ini banyak diaplikasikan pada logam berat (Cd, Ni, Cu, Zn, dan Pb) tetapi dapat digunakan untuk elemen lainnya (Se dan As) dan senyawa organik. Teknik ini lebih khusus digunakan untuk tumbuhan hiperakumulator, yang mempunyai kemampuan untuk menyimpan logam yang spesifik dalam konsentrasi yang tinggi di bagian aerial (0,01% sampai 1% berat kering, tergantung logamnya).
- 2) Fitofiltrasi: proses ini menggunakan tumbuhan untuk menyerap, mengumpulkan, dan mengendapkan kontaminan, terutama logam berat atau unsur radioaktif,

dari media air melalui sistem perakaran atau organ terendam lainnya. Tumbuhan dalam sistem hidroponik dimana efluen yang terlewat dan disaring oleh akar (rhizofiltrasi), atau organ lain yang menyerap dan mengumpulkan kontaminan. Tumbuhan dengan biomassa akar yang tinggi, atau mempunyai absorpsi permukaan yang tinggi, dengan lebih banyak kapasitas akumulasi (hiperakumulator di air) dan toleransi terhadap kontaminan mencapai hasil terbaik.

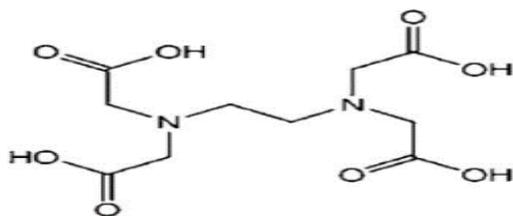
- 3) Fitostabilisasi (fitomobilisasi): kontaminan organik atau anorganik, dimasukkan ke dalam lingkin di dinding sel dari akar sel menjadi humus. Logam diendapkan sebagai bentuk yang tidak larut oleh eksudat akar dan kemudian terjebak di dalam matriks tanah. Tujuan utamanya adalah untuk menghindari mobilisasi dari kontaminan dan membatasi difusi kontaminan ke dalam tanah.
- 4) Rhizodegradasi (fitostimulasi): akar yang tumbuh dapat mendorong perkembangan mikroorganisme rizosfer yang merusak dan memanfaatkan eksudat dan metabolisme tumbuhan sebagai sumber karbon dan energi. Selain itu, tumbuhan dapat mengeluarkan enzim biodegradasi sendiri. Penggunaan rhizodegradasi terbatas pada kontaminan organik.
- 5) Fitodegradasi (fitotransformasi): kontaminan organik terdegradasi (dimetabolisme) atau termineralisasi didalam sel tumbuhan oleh enzim spesifik yang meliputi *nitroreductase* (degradasi senyawa aromatik), *dehalogenase* (degradasi pelarut terklorinase dan pestisida), dan *laccases* (degradasi anilin).
- 6) Fitovolatilisasi: teknik ini bergantung pada kemampuan beberapa tumbuhan untuk menyerap dan menguapkan logam tertentu atau metalloid. Beberapa ion pada elemen kelompok IIB, VA dan VIA dari tabel periodik (khususnya Hg, Se, dan As) diserap oleh akar, diubah menjadi bentuk tidak beracun, dan kemudian dilepaskan ke atmosfer.

Fitoekstraksi adalah metode paling umum yang digunakan dalam proses fitoremediasi Pb, yang bekerja atas prinsip penggunaan tumbuhan yang hiperakumulatif untuk meremediasi Pb, lalu tumbuhan tersebut dipanen dan dijual untuk industri yang dapat mengekstraksi logam dari tumbuhan. Logam tersebut dapat diproses lagi untuk dapat didaur ulang atau dibuang sebagai limbah [22].

B. Tumbuhan Hiperakumulator

Tumbuhan hiperakumulator dapat menyerap sejumlah zat beracun, biasanya logam atau metalloid selama pertumbuhan dan reproduksi normal [23]. Karakteristik tumbuhan hiperakumulator adalah: (i) Tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan bagian aerial; (ii) Tingkat laju penyerapan unsur dari tanah yang tinggi dibanding tumbuhan lain; (iii) Memiliki kemampuan mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke bagian aerial dengan laju yang tinggi [24].

BCF (*bioconcentration factor*) diketahui dengan membandingkan antara konsentrasi kontaminan pada tumbuhan dengan konsentrasi kontaminan di media tumbuh. Apabila nilai $BCF > 1$, maka zat tersebut berpotensi terakumulasi dalam tumbuhan dan dapat dipertimbangkan sebagai tumbuhan hiperakumulator [25]. Konsentrasi logam



Gambar 1. Struktur Molekul EDTA.

pada tumbuhan hiperakumulator setidaknya harus 10 sampai 500 kali lebih tinggi daripada yang ditemukan pada tumbuhan yang tumbuh di tanah yang tidak tercemar (misalnya Cd 1 mg/kg, Pb 5 mg/kg, dan Zn 100 mg/kg) [26]. Tumbuhan hiperakumulator (tumbuhan yang mampu mengakumulasi Cd > 100 mg/kg, Pb > 1000 mg/kg, dan Zn > 10000 mg/kg) dalam berat kering pada bagian aerial ketika tumbuh di habitat alami [27]. Contoh tumbuhan hiperakumulator yang dapat digunakan untuk fitoremediasi Pb adalah *Brassica juncea*, *Thlaspi rotundifolium*, *Helianthus annuus L.*, dan *Typha angustifolia*.

V. AGEN PENGKELAT EDTA

Kesuksesan fitoremediasi harus melibatkan adanya mobilisasi dari Pb yang beracun ke dalam larutan tanah yang berhubungan langsung dengan akar tumbuhan. Faktor utama yang mempengaruhi efisiensi fitoekstraksi adalah kemampuan tumbuhan untuk menyerap Pb dalam jumlah yang besar dalam waktu yang singkat. Untuk meningkatkan kecepatan dan jumlah logam yang terremoval, beberapa peneliti menganjurkan penggunaan berbagai bahan kimia untuk meningkatkan jumlah Pb yang tersedia untuk serapan tumbuhan [28]. Agen pengkelat dapat membebaskan Pb dari suatu area melalui proses pertukaran kation tanah dengan membentuk kompleks dengan Pb, sehingga memungkinkan spesies logam EDTA untuk berpindah lebih mudah di tanah sebagai kompleks Pb-EDTA. Setelah Pb diambil dari area pertukaran kation, Pb-EDTA dapat diambil langsung oleh akar tumbuhan [29]. Penambahan EDTA pada tanah meningkatkan konsentrasi total logam terlarut [30]. Untuk mengatasi ketersediaan logam yang relatif rendah ditanah, salah satu pendekatan alternatif yang digunakan adalah penggunaan agen pengkelat organik [30], yang dapat meningkatkan penyerapan dan translokasi Pb pada bagian aerial tumbuhan [31].

EDTA dapat meningkatkan desorpsi Pb dari tanah dan meningkatkan kelarutan Pb di tanah [5]. Efektivitas EDTA dalam menginduksi desorpsi logam dari tanah dan meningkatkan fitoekstraksi logam berat tergantung pada jenis logam berat dan tumbuhan. Konstanta kestabilan untuk kompleks Pb-EDTA adalah 18 [32]. Struktur EDTA terdapat pada Gambar 1 [33].

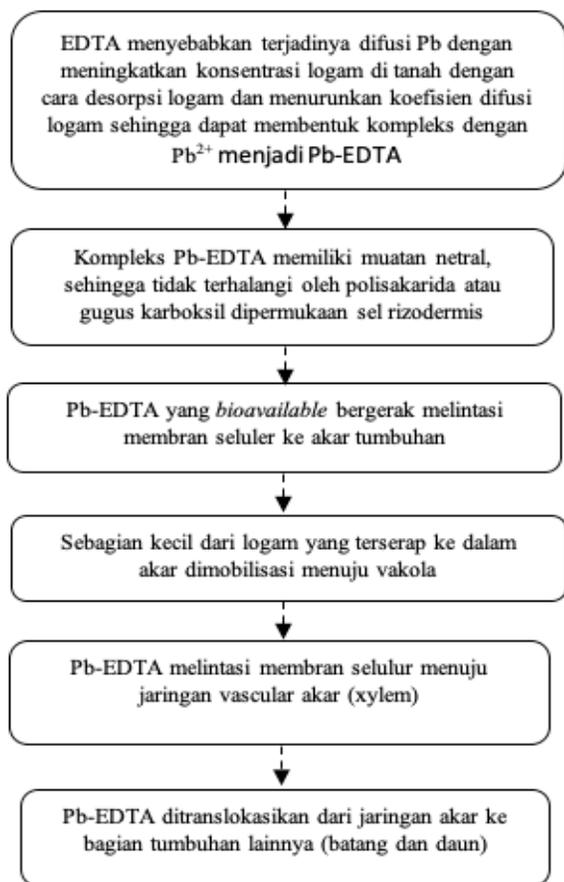
A. Pengaruh Penambahan EDTA

Pengaplikasian EDTA digunakan untuk mengkomplekskan logam yang terlarut didalam larutan tanah [34]. Akibat aktivitas logam bebas yang berkurang, ion-ion logam pengikat mulai mengimbangi perubahan kesetimbangan. Proses ini berlanjut

sampai pengkelat jenuh, dan ketersediaan logam fase padat sudah habis atau kesetimbangan tercapai dan fase padat yang tidak larut membatasi aktivitas logam bebas. Dalam kasus EDTA, pembentukan Pb-EDTA diperkirakan akan menjadi kompleks dominan Pb-EDTA di sebagian besar tanah yang mempunyai pH 5.2 hingga pH 7.7, hal ini membuktikan bahwa total konsentrasi Pb dan kelarutan fase padat Pb spesifik tidak terbatas [35]. Apabila EDTA ditambahkan dalam jumlah yang cukup, hampir semua Pb yang dapat larut akan membentuk kompleks Pb-EDTA dengan aktivitas Pb^{2+} yang sangat rendah. Penambahan agen pengkelat EDTA dapat meningkatkan konsentrasi Pb dalam biomassa tumbuhan sebanyak 100 kali lipat [36]. Studi menunjukkan EDTA sebagai agen pengkelat yang paling efisien dan efektif untuk meningkatkan kelarutan Pb dalam tanah dan telah banyak digunakan untuk ekstraksi logam berat dari tanah yang terkontaminasi [37]. Aplikasi EDTA untuk tanah yang terkontaminasi logam berat dapat meningkatkan penyerapan logam dari tanah lebih dari 1% berat kering pada bagian aerial tumbuhan [34]. Peningkatan penyerapan Pb menggunakan EDTA oleh akar tumbuhan disebabkan oleh pembentukan kompleks Pb-EDTA yang dapat larut [29]. Kompleks logam-EDTA dilaporkan mudah diambil oleh sebagian besar spesies tumbuhan [38], terutama oleh tumbuhan hiperakumulator [39].

Agan pengompleks organik dapat meningkatkan kelarutan kation logam dalam media pertumbuhan tumbuhan [5]. Penambahan agen pengkelat EDTA juga dapat meningkatkan BCF (*bioaccumulation factor*) masing-masing tumbuhan [29]. Dalam proses fitoekstraksi dengan bantuan agen pengkelat yang ditambahkan ke dalam tanah, pengkelat dapat menyerap logam dari matriks tanah, dan logam yang dimobilisasi pindah ke rizosfer untuk diserap oleh akar tumbuhan. Jumlah logam yang *bioavailable* dalam tanah sangat ditentukan oleh sifat tanah dan pengkelat yang digunakan [5]. Efisiensi dari 5 agen pengkelat dalam meningkatkan akumulasi Pb di bagian aerial tumbuhan jagung dan kacang polong yang ditumbuhkan pada tanah tercemar Pb 2500 mg/kg. Urutan efektivitas agen pengkelat dalam meningkatkan Pb pada tumbuhan jagung dan kacang polong adalah EDTA > HEDTA > DTPA > EDTA > EDDHA [5]. Dalam kebanyakan kasus, penambahan EDTA lebih baik dalam melarutkan Pb di tanah untuk dapat diambil oleh akar dan ditranslokasikan pada bagian aerial tumbuhan karena afinitas EDTA yang kuat untuk Pb [40]. Akumulasi Pb di bagian aerial berkorelasi dengan pembentukan kompleks Pb-EDTA, dan Pb-EDTA adalah bentuk utama Pb yang mudah diserap dan ditranslokasi oleh tumbuhan [6], [41]. EDTA lebih efektif dalam melarutkan logam dibandingkan dengan EDDS [42]. EDTA lebih efektif daripada NTA, DTPA, asam sitrat, asam askorbat, asam oksalat, asam salisilat, dan NH_4 asetat dalam penyerapan Pb oleh *Zea mays* [43].

EDTA menyebabkan peningkatan penyerapan Pb dalam akar *Vetiveria zizanioides* 15 kali lipat [44]. Konsentrasi larutan EDTA pada 0-10 mmol/kg tanah yang ditambahkan pada tanah tercemar Pb 1000 mg/kg dalam bentuk $Pb(NO_3)_2$ selama 14 hari, konsentrasi 10 mmol/kg EDTA adalah konsentrasi terbaik



Gambar 2. Mekanisme Pb-EDTA Memasuki Tumbuhan.

dalam fitoremediasi Pb menggunakan tumbuhan *Vetiveria zizanioides* [44]. EDTA lebih efisien dalam meningkatkan konsentrasi Pb di bagian aerial dibandingkan dengan asam sitrat [45].

Pb dapat diserap oleh akar tumbuhan dan menjadi kompleks Pb-EDTA [41]. Pada bagian daun *Phaseolus vulgaris* beberapa Pb dapat membentuk kompleks dengan EDTA [46]. Kompleks Pb-EDTA tidak dapat dipisahkan melalui reduksi atau oksidasi dari Pb. Pb-EDTA tidak dapat terdifusi melintasi membran plasma pada tingkat yang signifikan karena terlalu besar dan polar untuk melewati lapisan lipid plasmalemma bilayer. Dapat disimpulkan bahwa penyerapan Pb-EDTA oleh tumbuhan terjadi di lokasi dimana suberisasi dinding sel akar belum terjadi dan pada saat rusaknya endodermis akar dan strip kasparya [47]. Oleh karena itu, beberapa kerusakan yang terjadi pada akar dapat berguna untuk pengambilan Pb-EDTA oleh akar tumbuhan. Kerusakan akar dapat disebabkan oleh toksistas logam, pengkelat, dan hal lainnya [41].

Perencanaan waktu pengaplikasian EDTA merupakan hal penting yang harus dilakukan untuk menghindari kompleks Pb-EDTA bergerak menuju air tanah. Tetapi, karena EDTA memicu hiperakumulasi Pb pada tumbuhan secara cepat, EDTA dapat diaplikasikan pada zona akar apabila tumbuh subur di lokasi yang terkontaminasi [5]. Meskipun EDTA adalah agen pengkelat yang efisien dan efektif, tetapi EDTA memiliki biodegradabilitas yang rendah dan persisten di lingkungan.

Selain itu, EDTA juga dapat membentuk kompleks dengan semua jenis logam, yang mana hal ini dapat memobilisasi elemen yang bermanfaat bagi tumbuhan (misalnya, kalsium dan zat besi) [48].

B. Mekanisme Fitoremediasi Pb-EDTA

EDTA dapat menghilangkan dua faktor yang menyebabkan keterbatasan fitoekstraksi Pb dari tanah yang terkontaminasi yaitu rendahnya bioavailabilitas Pb di tanah dan rendahnya translokasi Pb dari akar ke bagian aerial [5]. EDTA bebas membentuk kompleks Pb-EDTA di daerah perakaran yang dapat meningkatkan transportasi Pb ke bagian aerial tumbuhan [49]. Proses terjadinya mobilisasi logam dari akar dapat disebabkan oleh [49]:

- 1) EDTA menstimulasi eksudat akar (senyawa pengkelat alami)
- 2) Meningkatnya transportasi dan akumulasi kompleks Pb-EDTA di rizosfer
- 3) Mengurangi terjadinya *leaching* dari kompleks Pb-EDTA karena transpirasi yang besar pada tumbuhan
- 4) EDTA mempengaruhi kebocoran pada membran akar dan melepaskan logam ke rizosfer. Mekanisme ini dapat terjadi secara bersamaan.

Efisiensi penyerapan Pb dengan penambahan EDTA oleh akar tumbuhan tergantung pada jenis tanah, tumbuhan, jenis logam, termasuk konsentrasi logam dalam tanah, pH tanah, kapasitas pertukaran kation, jenis tumbuhan, dan usia tumbuhan [8]. EDTA membentuk kompleks dengan Pb di luar tumbuhan, kemudian kompleks Pb-EDTA memasuki tumbuhan melalui xylem dan terakumulasi di daun. Setelah diserap ke permukaan akar rhizodermis, Pb dapat memasuki akar secara pasif dan mengikuti translokasi aliran air yang masuk ke dalam tumbuhan [50].

Penyerapan logam ke akar melibatkan (1) pergerakan logam yang telah larut ke akar tumbuhan melalui aliran massa atau difusi [51], (2) adsorpsi pada akar, dan (3) keterikatan pada gugus fungsi pada permukaan sel rhizodermis [50]. Kompleks Pb-EDTA mempengaruhi langkah penyerapan logam ke akar. Awalnya, EDTA menyebabkan terjadinya difusi logam melalui akar dengan meningkatkan konsentrasi logam di tanah dengan cara desorpsi logam dan menurunkan koefisien difusi logam dalam bentuk kompleks Pb-EDTA [51]. Karena kompleks Pb-EDTA memiliki muatan netral, kompleks ini tidak terhalangi oleh polisakarida atau gugus karboksil dipermukaan sel rhizodermis [52].

Oleh sebab itu, EDTA dapat menyebabkan terjadinya pergerakan Pb langsung ke akar. EDTA membentuk kompleks dengan Pb dalam larutan tanah, kemudian memasuki tumbuhan [41]. Namun, ada beberapa hipotesis tentang apakah kompleks EDTA berdisosiasi sebelum memasuki akar tumbuhan atau masuk sebagaimana adanya yaitu sebagai Pb-EDTA ke dalam xylem [53], [54]. Kompleks Pb-EDTA tidak beracun dan terurai setelah memasuki akar, membentuk ion logam berat bebas yang dapat menyebabkan (menginduksikan) fitotoksistasitas [46]. Analisis *Inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS) pada getah xylem menunjukkan adanya kompleks logam-EDTA dan tidak adanya bentuk EDTA di

Hordeum vulgare yang tumbuh di tanah yang terkontaminasi dengan penambahan EDTA.

Skema Mekanisme Fitoremediasi Menggunakan Agen Pengkelat terdapat pada Gambar 2.

C. Recovery EDTA

EDTA relatif stabil terhadap mikroorganisme dan hanya terdegradasi sebagian pada kondisi yang khusus. Pada lokasi aslinya, mikroorganisme tanah tidak disesuaikan dengan EDTA dan memiliki kemampuan yang sedikit untuk mendegradasinya, hal ini dipandang baik dari sudut pandang penggunaan EDTA kembali. Dengan demikian, potensi penggunaan kembali EDTA untuk ekstraksi logam dari tanah tinggi dan membuat penggunaannya menguntungkan secara ekonomi. Sebagai agen pengkelat yang kuat, EDTA dapat digunakan kembali dan relatif *biostable*. EDTA dapat di *recovery* kembali dengan menggunakan endapan kation dan anion seperti ion sulfida. Hal itu membuat EDTA dapat digunakan kembali beberapa kali untuk aktivitas ekstraksi [55].

Penambahan EDTA menghasilkan peningkatan kelarutan yang tinggi dalam proses ekstraksi dan fitoremediasi Pb sekaligus memungkinkan terjadinya *leaching* Pb ke dalam lapisan tanah. Untuk meningkatkan efisiensi fitoremediasi dan mengurangi risiko terhadap lingkungan yang disebabkan oleh EDTA, perlu dilakukan pemilihan spesies tumbuhan yang lebih sensitif terhadap penggunaan agen pengkelat tidak hanya membantu meminimalkan jumlah EDTA yang diaplikasikan di lapangan, tetapi juga dapat mengurangi risiko yang terjadi dilingkungan dari logam yang dimobilisasi [56].

VI. KESIMPULAN

Fitoremediasi adalah teknologi yang digunakan pada berbagai tumbuhan untuk menurunkan, mengekstrak, menahan, dan menghentikan pergerakan kontaminan dari tanah dan air. Fitoremediasi Pb mengalami kesulitan karena beberapa faktor yang menyebabkan keterbatasan fitoekstraksi Pb dari tanah yang terkontaminasi, yaitu rendahnya *bioavailabilitas* Pb di tanah dan rendahnya translokasi Pb dari akar ke bagian aerial. Rendahnya *bioavailabilitas* Pb di tanah disebabkan oleh terikatnya Pb pada mineral-mineral yang ada di tanah. EDTA merupakan agen pengkelat yang dapat mempercepat proses fitoekstraksi Pb. EDTA dapat meningkatkan desorpsi Pb dari tanah dan meningkatkan kelarutan Pb di tanah sehingga mudah untuk diambil oleh tumbuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Safarriada and J. Ngadiman, "Fitoremediasi kandungan kromium pada limbah cair menggunakan tanaman air," *J. Bioteknologi dan Biosains*, vol. 2, no. 2, pp. 55–59, 2015.
- [2] S. A. Arasy and others, "Penyisihan Konsentrasi Pb Menggunakan Typha Latifolia dengan Metode Sub-Surface Flow Constructed Wetland," Riau University.
- [3] P. E. Flathman and G. R. Lanza, "Phytoremediation: current views on an emerging green technology," *J. Soil Contam.*, vol. 7, no. 4, pp. 415–432, 1998.
- [4] S. Mangkoedihardjo and G. Samudro, *Fitoteknologi Terapan*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2010.
- [5] J. W. Huang, J. Chen, W. R. Berti, and S. D. Cunningham, "Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 800–805, 1997.
- [6] A. L. Epstein *et al.*, "EDTA and Pb—EDTA accumulation in Brassica juncea grown in Pb—amended soil," *Plant Soil*, vol. 208, no. 1, pp. 87–94, 1999.
- [7] Z.-T. Xiong, "Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species *Sonchus oleraceus* L.," *Environ. Pollut.*, vol. 97, no. 3, pp. 275–279, 1997.
- [8] M. Shahid *et al.*, "EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: a review," *Soil Sediment Contam. An Int. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 389–416, 2014.
- [9] A. Manara, "Plant responses to heavy metal toxicity," in *Plants and heavy metals*, Springer, 2012, pp. 27–53.
- [10] M. J. Eick, J. D. Peak, P. V. Brady, and J. D. Pesek, "Kinetics of lead adsorption/desorption on goethite: Residence time effect," *Soil Sci.*, vol. 164, no. 1, pp. 28–39, 1999.
- [11] H. Abadin, A. Ashizawa, F. Lladós, and Y.-W. Stevens, "Toxicological profile for lead," 2007.
- [12] M. B. Rabinowitz, G. W. Wetherill, and J. D. Kopple, "Lead metabolism in the normal human: stable isotope studies," *Science (80-)*, vol. 182, no. 4113, pp. 725–727, 1973.
- [13] M. B. Rabinowitz, "Toxicokinetics of bone lead," *Environ. Health Perspect.*, vol. 91, pp. 33–37, 1991.
- [14] S. Mishra, S. Srivastava, R. D. Tripathi, R. Kumar, C. S. Seth, and D. K. Gupta, "Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatin and antioxidant system in response to its accumulation," *Chemosphere*, vol. 65, no. 6, pp. 1027–1039, 2006.
- [15] A. Bacic, G. B. Fincher, and B. A. Stone, *Chemistry, biochemistry, and biology of 1-3 beta glucans and related polysaccharides*. Academic Press, 2009.
- [16] Z.-T. Xiong, F. Zhao, and M. Li, "Lead toxicity in Brassica pekinensis Rupr.: effect on nitrate assimilation and growth," *Environ. Toxicol. An Int. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 147–153, 2006.
- [17] I. V. Seregin, L. K. Shpigun, and V. B. Ivanov, "Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots," *Russ. J. Plant Physiol.*, vol. 51, no. 4, pp. 525–533, 2004.
- [18] U. S. P. A. (USEPA), "Introduction to Phytoremediation.—EPA 600/R-99/107." US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development—..., 2000.
- [19] H. Hardiani, "Potensi tanaman dalam mengakumulasi logam Cu pada media tanah terkontaminasi limbah padat industri kertas," *Ber. Selulosa*, vol. 44, no. 1, pp. 27–40, 2009.
- [20] M. S. Sunitha, S. Prashant, S. A. Kumar, S. Rao, M. L. Narasu, and P. B. K. Kishor, "Cellular and molecular mechanisms of heavy metal tolerance in plants: a brief overview of transgenic plants overexpressing phytochelatin synthase and metallothionein genes," *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.*, vol. 14, no. 1–2, pp. 33–48, 2013.
- [21] P. J. C. Favas, J. Pratas, M. Varun, R. D'Souza, and M. S. Paul, "Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora," *Environ. risk Assess. soil Contam.*, vol. 3, pp. 485–516, 2014.
- [22] S. S. S. OroojSurriya, K. Waqar, and A. G. Kazi, "Phytoremediation of soils: prospects and challenges," *Soil Remediat. plants Prospect. challenges*, p. 1, 2014.
- [23] R. D. Reeves, "The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants," *Veg. ultramafic soils*, pp. 253–277, 1992.
- [24] N. Hidayati, "Fitoremediasi dan potensi tumbuhan hiperakumulator," *Hayati J. Biosci.*, vol. 12, no. 1, pp. 35–40, 2005.
- [25] R. Irawanto and S. Mangkoedihardjo, "Phytoforensic of Heavy Metals (Pb and Cd) in Aquatic Plants (*Acanthus ilicifolius* and *Coix lacrymajobi*)," *J. Purifikasi*, vol. 15, no. 1, pp. 53–66, 2015.
- [26] D. C. Adriano, "Arsenic," in *Trace elements in terrestrial environments*, Springer, 2001, pp. 219–261.
- [27] S. S. Rathore, K. Shekhawat, A. Dass, B. K. Kandpal, and V. K. Singh, "Phytoremediation mechanism in Indian mustard (*Brassica juncea*) and its enhancement through agronomic interventions," *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. B Biol. Sci.*, vol. 89, no. 2, pp. 419–427, 2019.
- [28] M. N. Vara Prasad and H. M. de Oliveira Freitas, "Metal hyperaccumulation in plants: biodiversity prospecting for phytoremediation technology," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 6, no. 3, pp. 285–321, 2003.
- [29] S. Dipu, A. A. Kumar, and S. G. Thanga, "Effect of chelating agents in phytoremediation of heavy metals," *Remediat. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 133–

- 146, 2012.
- [30] B. Nowack, R. Schulin, and B. H. Robinson, "Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 17, pp. 5225–5232, 2006.
- [31] M. W. H. Evangelou, M. Ebel, and A. Schaeffer, "Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents," *Chemosphere*, vol. 68, no. 6, pp. 989–1003, 2007.
- [32] M. Niinae, K. Nishigaki, and K. Aoki, "Removal of lead from contaminated soils with chelating agents," *Mater. Trans.*, p. 809010528, 2008.
- [33] K. Rekab, C. Lepeyre, F. Goettmann, M. Dunand, C. Guillard, and J.-M. Herrmann, "Degradation of a cobalt (II)-EDTA complex by photocatalysis and H₂O₂/UV-C. Application to nuclear wastes containing 60 Co," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 303, no. 1, pp. 131–137, 2015.
- [34] M. J. Blaylock *et al.*, "Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 860–865, 1997.
- [35] L. E. Sommers and W. L. Lindsay, "Effect of pH and redox on predicted heavy metal-chelate equilibria in soils," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 39–47, 1979.
- [36] S. D. Cunningham and W. R. Berti, "Phytoextraction and phytostabilization: technical, economic and regulatory considerations of the soil-lead issue," *Phytoremediation Contam. soil water*, 2000.
- [37] M. Pocięcha and D. Lestan, "Electrochemical EDTA recycling with sacrificial Al anode for remediation of Pb contaminated soil," *Environ. Pollut.*, vol. 158, no. 8, pp. 2710–2715, 2010.
- [38] R. N. Collins, G. Merrington, M. J. McLaughlin, and C. Knudsen, "Uptake of intact zinc-ethylenediaminetetraacetic acid from soil is dependent on plant species and complex concentration," *Environ. Toxicol. Chem. An Int. J.*, vol. 21, no. 9, pp. 1940–1945, 2002.
- [39] E. E. Awokunmi, S. S. Asaolu, O. O. Ajayi, and O. A. Adebayo, "The role of EDTA on heavy metals phytoextraction by *Jatropha gossypifolia* grown on soil collected from dumpsites in Ekiti state Nigeria," *Br. J. Environ. Clim. Chang.*, vol. 2, no. 2, p. 153, 2012.
- [40] R. M. Smith, A. E. Martell, and R. J. Motekaitis, "NIST standard reference database 46," *NIST Crit. Sel. Stab. Constants Met. Complexes Database Ver.*, vol. 2, 2004.
- [41] A. D. Vassil, Y. Kapulnik, I. Raskin, and D. E. Salt, "The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard," *Plant Physiol.*, vol. 117, no. 2, pp. 447–453, 1998.
- [42] C. Luo, Z. Shen, L. Lou, and X. Li, "EDDS and EDTA-enhanced phytoextraction of metals from artificially contaminated soil and residual effects of chelant compounds," *Environ. Pollut.*, vol. 144, no. 3, pp. 862–871, 2006.
- [43] E. Meers, M. Hopgood, E. Lesage, P. Vervaeke, F. M. G. Tack, and M. G. Verloo, "Enhanced phytoextraction: in search of EDTA alternatives," *Int. J. Phytoremediation*, vol. 6, no. 2, pp. 95–109, 2004.
- [44] S. S. Andra, R. Datta, D. Sarkar, S. K. M. Saminathan, C. P. Mullens, and S. B. H. Bach, "Analysis of phytochelatin complexes in the lead tolerant vetiver grass [*Vetiveria zizanioides* (L.)] using liquid chromatography and mass spectrometry," *Environ. Pollut.*, vol. 157, no. 7, pp. 2173–2183, 2009.
- [45] D. Muhammad, F. Chen, J. Zhao, G. Zhang, and F. Wu, "Comparison of EDTA-and citric acid-enhanced phytoextraction of heavy metals in artificially metal contaminated soil by *Typha angustifolia*," *Int. J. Phytoremediation*, vol. 11, no. 6, pp. 558–574, 2009.
- [46] G. Sarret *et al.*, "Accumulation forms of Zn and Pb in *Phaseolus vulgaris* in the presence and absence of EDTA," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 13, pp. 2854–2859, 2001.
- [47] P. F. Bell, R. L. Chaney, and J. S. Angle, "Free metal activity and total metal concentrations as indices of micronutrient availability to barley [*Hordeum vulgare* (L.) 'Klages']," *Plant Soil*, vol. 130, no. 1–2, pp. 51–62, 1991.
- [48] L. Wu, Y. Luo, and J. Song, "Manipulating soil metal availability using EDTA and low-molecular-weight organic acids," in *Phytoremediation*, Springer, 2007, pp. 291–303.
- [49] W. W. Wenzel, R. Unterbrunner, P. Sommer, and P. Sacco, "Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments," *Plant Soil*, vol. 249, no. 1, pp. 83–96, 2003.
- [50] B. Pourrut, M. Shahid, C. Dumat, P. Winterton, and E. Pinelli, "Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants," in *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 213*, Springer, 2011, pp. 113–136.
- [51] F. Degryse, E. Smolders, and R. Merckx, "Labile Cd complexes increase Cd availability to plants," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 830–836, 2006.
- [52] M. Hasan *et al.*, "Assisting phytoremediation of heavy metals using chemical amendments," *Plants*, vol. 8, no. 9, p. 295, 2019.
- [53] L. Wu *et al.*, "Effects of organic amendments on Cd, Zn and Cu bioavailability in soil with repeated phytoremediation by *Sedum plumbizincicola*," *Int. J. Phytoremediation*, vol. 14, no. 10, pp. 1024–1038, 2012.
- [54] L. A. Schaidler, D. R. Parker, and D. L. Sedlak, "Uptake of EDTA-complexed Pb, Cd and Fe by solution-and sand-cultured *Brassica juncea*," *Plant Soil*, vol. 286, no. 1–2, pp. 377–391, 2006.
- [55] P. K. A. Hong, C. Li, S. K. Banerji, and T. Regmi, "Extraction, recovery, and biostability of EDTA for remediation of heavy metal-contaminated soil," *J. Soil Contam.*, vol. 8, no. 1, pp. 81–103, 1999.
- [56] J. Luo, S. Qi, X. W. S. Gu, J. Wang, and X. Xie, "An evaluation of EDTA additions for improving the phytoremediation efficiency of different plants under various cultivation systems," *Ecotoxicology*, vol. 25, no. 4, pp. 646–654, 2016.