

Analisis Teoritis Pengaruh pH terhadap mobilitas logam berat dalam tanah

Farda Hidayatul Rusdiyah¹

¹ Kimia, Universitas Islam negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
e-mail: fardarusdiyah@gmail.com

Kata Kunci:

Analisis, Logam Berat, pH Tanah, Mobilitas, Remediasi

Keywords:

analysis, Heavy Metals, Soil pH, Mobility, Remediation

ABSTRAK

Analisis teoritis ini mengeksplorasi pengaruh pH tanah terhadap mobilitas logam berat, dengan fokus pada pengaruhnya terhadap reaksi kimia yang menentukan ketersediaan, mobilitas, dan toksisitas logam berat dalam tanah. pH rendah (kondisi asam) secara umum meningkatkan mobilitas logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan seng (Zn) dengan meningkatkan kelarutannya dan mengurangi adsorpsi pada partikel tanah. Sebaliknya, pH tinggi (kondisi basa) mendorong pengendapan dan adsorpsi kuat logam berat, sehingga membatasi mobilitasnya dan menurunkan risiko pencemaran

lingkungan. Makalah ini juga membahas implikasinya untuk strategi remediasi tanah dan praktik pertanian, menyoroti bagaimana penyesuaian pH dapat dimanfaatkan secara efektif untuk mengelola pencemaran logam berat. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mendalami interaksi ini demi mengoptimalkan praktik remediasi dan memastikan pertanian berkelanjutan di lahan yang terkontaminasi.

ABSTRACT

This theoretical analysis explores the impact of soil pH on the mobility of heavy metals, focusing on its influence on chemical reactions that determine the availability, mobility, and toxicity of heavy metals in the soil. Low pH (acidic conditions) generally increases the mobility of heavy metals like lead (Pb), cadmium (Cd), and zinc (Zn) by enhancing their solubility and reducing adsorption to soil particles. Conversely, higher pH (alkaline conditions) promotes the precipitation and strong adsorption of heavy metals, thereby limiting their mobility and decreasing environmental contamination risks. This paper also discusses the implications for soil remediation strategies and agricultural practices, highlighting how pH adjustments can be effectively utilized to manage heavy metal pollution. Future research should further explore these interactions to optimize remediation practices and ensure sustainable agriculture on contaminated lands.

Pendahuluan

Keberadaan logam berat dalam tanah, seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), dan kromium (Cr), umumnya diakibatkan oleh aktivitas manusia maupun sumber alami. Kegiatan industri, penggunaan pestisida dan pupuk dalam pertanian, serta limbah perkotaan sering kali menyebabkan akumulasi logam berat di lingkungan tanah. Kondisi ini meningkatkan risiko kontaminasi lingkungan yang lebih luas (Oktavian et al., 2024). Keberadaan logam berat dalam tanah sangat relevan karena logam berat bersifat toksik, tidak dapat terurai secara alami, dan cenderung terakumulasi dalam jaringan organisme hidup. Akumulasi ini dapat menyebabkan gangguan pada ekosistem serta masuk ke rantai makanan melalui penyerapan oleh tanaman, sehingga paparan logam berat dalam jangka panjang pada manusia dapat mengakibatkan masalah kesehatan serius, termasuk kerusakan organ, gangguan saraf, hingga risiko kanker. Dalam konteks pengaruh lingkungan, pH tanah memainkan peran penting dalam menentukan mobilitas



This is an open access article under the [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

logam berat. Pada pH rendah atau kondisi tanah asam, logam berat cenderung lebih mudah larut, sehingga memiliki potensi lebih besar untuk mencemari air tanah atau diserap tanaman. Sebaliknya, pada pH tinggi atau kondisi tanah basa, logam berat lebih mudah terikat dengan partikel tanah, menjadikannya kurang mobile (Alina Kabata-Pendias (Eds.), 2012).

Pentingnya Memahami Pengaruh pH Terhadap Mobilitas Logam Berat

Memahami pengaruh pH terhadap mobilitas logam berat sangat penting karena pH adalah salah satu faktor utama yang mengendalikan ketersediaan dan perilaku logam berat dalam tanah. Pada pH rendah (kondisi asam), logam berat cenderung lebih mudah larut dan bergerak bebas dalam larutan tanah, meningkatkan kemungkinan logam tersebut tercuci ke lapisan tanah yang lebih dalam dan mencemari air tanah. Di sisi lain, pada pH yang lebih tinggi (kondisi basa), logam berat lebih cenderung berikatan dengan partikel tanah atau membentuk senyawa yang kurang larut, sehingga mengurangi mobilitas dan ketersediaannya bagi tanaman atau organisme lainnya (Hindarwati et al., 2023). Pemahaman ini juga penting untuk pengelolaan tanah dan strategi remediasi. Dalam tanah yang terkontaminasi, manipulasi pH dapat digunakan untuk mengurangi mobilitas logam berat, seperti dengan menambah bahan kapur pada tanah asam untuk menurunkan mobilitas logam dan mengurangi risiko pencemaran. Dengan demikian, pengaruh pH terhadap mobilitas logam berat memiliki implikasi besar dalam pengendalian pencemaran tanah dan melindungi kesehatan ekosistem dan manusia (Alina Kabata-Pendias (Eds.), 2012).

Tujuan utama dari analisis teoritis mengenai pengaruh pH terhadap mobilitas logam berat dalam tanah adalah untuk memahami mekanisme kimia yang mengontrol ketersediaan dan pergerakan logam berat. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi bagaimana perubahan pH mempengaruhi proses adsorpsi, desorpsi, kompleksasi, dan presipitasi logam berat dalam tanah. Pemahaman ini sangat penting untuk memprediksi risiko pencemaran lingkungan dan membantu dalam perencanaan strategi pengelolaan tanah, seperti remediasi lahan yang terkontaminasi oleh logam berat.

Lingkup analisis ini meliputi studi tentang interaksi kimia antara logam berat dan komponen tanah, termasuk mineral tanah, bahan organik, dan mikroorganisme, serta bagaimana kondisi pH memengaruhi interaksi ini. Selain itu, analisis ini mempertimbangkan model-model teoritis dan empiris yang telah dikembangkan untuk menggambarkan mobilitas logam berat pada berbagai kondisi pH, seperti model adsorpsi Langmuir dan Freundlich, yang sering digunakan untuk menjelaskan distribusi logam berat dalam larutan tanah dan fase padat (Bradl, 2004). Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan panduan untuk penelitian eksperimental lebih lanjut dan aplikasi praktis dalam pengendalian pencemaran tanah.

Pembahasan

Karakteristik Logam Berat Dalam Tanah

Logam berat yang umum ditemukan dalam tanah dan sering menjadi perhatian karena sifat toksisitasnya meliputi timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), dan kromium (Cr).

1. **Timbal (Pb)** - Sumber utama timbal di lingkungan berasal dari aktivitas manusia, seperti penggunaan bahan bakar timbal, cat, industri baterai, dan pembuangan limbah industri. Logam ini memiliki toksisitas tinggi dan dapat menyebabkan gangguan sistem saraf serta efek toksik lainnya pada manusia dan hewan.
2. **Kadmium (Cd)** - Kadmium terutama berasal dari penggunaan pupuk fosfat, aktivitas penambangan, dan produksi logam. Kadmium mudah diserap oleh tanaman dan berakumulasi dalam rantai makanan, sehingga paparan jangka panjang dapat merusak ginjal dan sistem tulang manusia.
3. **Merkuri (Hg)** - Sumber utama merkuri di lingkungan adalah pembakaran batu bara, kegiatan industri, dan produk konsumen tertentu seperti termometer. Merkuri sangat beracun dan dapat mengalami bioakumulasi di ekosistem perairan, menyebabkan kerusakan neurologis jika terpapar dalam konsentrasi tinggi (Hooda, 2010).
4. **Kromium (Cr)** - Kromium, terutama dalam bentuk kromium heksavalen (Cr(VI)), bersifat karsinogenik dan berasal dari aktivitas seperti pelapisan logam, industri penyamakan kulit, dan proses industri lainnya. Kromium dapat menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan bagi manusia dan lingkungan (Lenntech, 2023).

Dampak keberadaan logam Berat bagi Ekosistem dan Kesehatan Manusia

Keberadaan logam berat dalam tanah dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Dalam ekosistem, logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), dan kromium (Cr) dapat mengganggu struktur dan fungsi mikroorganisme tanah yang esensial bagi dekomposisi dan siklus hara, yang pada gilirannya mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Akumulasi logam berat pada tanaman dapat masuk ke rantai makanan, mengancam kesehatan hewan herbivora dan predator yang berada di tingkat trofik lebih tinggi. Toksisitas logam berat juga dapat mengurangi keanekaragaman hayati, menyebabkan efek subletal dan bahkan kematian pada spesies yang terpapar dalam konsentrasi tinggi (Aditya et al., 2022).

Bagi kesehatan manusia, paparan logam berat melalui makanan, air, atau udara dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan serius. Misalnya, timbal diketahui menyebabkan gangguan pada sistem saraf, terutama pada anak-anak, yang berdampak pada perkembangan kognitif dan perilaku. Kadmium dapat menyebabkan kerusakan ginjal dan sistem tulang bila terakumulasi dalam tubuh manusia. Merkuri dapat menyebabkan kerusakan neurologis yang parah, dan kromium heksavalen (Cr(VI)) dikenal sebagai karsinogen yang dapat meningkatkan risiko kanker paru-paru, hati, dan saluran pernapasan (Bradl, 2004). Risiko ini semakin besar karena logam berat bersifat

bioakumulatif dan sulit terurai secara alami dalam lingkungan, membuatnya tetap ada dalam tanah dan rantai makanan untuk waktu yang lama.

Sumber kontaminasi logam berat di tanah

Kontaminasi logam berat di tanah berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun akibat aktivitas manusia. Sumber alami logam berat termasuk pelapukan batuan dan proses geokimia yang melepaskan logam berat ke dalam tanah secara bertahap. Namun, sebagian besar kontaminasi logam berat disebabkan oleh aktivitas manusia yang meningkatkan kadar logam di lingkungan. Sumber antropogenik utama mencakup aktivitas industri, seperti pertambangan, peleburan logam, produksi baterai, dan pembuangan limbah industri, yang sering mengandung logam berat seperti timbal, kadmium, dan merkuri. Penggunaan pupuk fosfat dan pestisida dalam pertanian juga berkontribusi terhadap akumulasi logam berat, terutama kadmium dan arsenik, dalam tanah. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil dalam sektor transportasi dan energi menghasilkan timbal dan merkuri yang dapat terakumulasi di tanah sekitar area industri dan perkotaan (Alina Kabata-Pendias (Eds.), 2012). Pengelolaan limbah yang tidak memadai adalah faktor lain yang berperan besar dalam penyebaran logam berat. Limbah domestik dan perkotaan yang mengandung logam berat dari produk rumah tangga (seperti baterai dan elektronik) sering kali tidak dikelola dengan baik, menyebabkan logam berat masuk ke lingkungan. Selain itu, penggunaan air irigasi yang tercemar di lahan pertanian juga berkontribusi terhadap peningkatan kadar logam berat dalam tanah (Hindarwati et al., 2023).

Konsep Dasar pH dan Keseimbangan Kimia dalam Tanah

pH adalah ukuran konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam larutan, yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan suatu medium. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14, di mana pH 7 dianggap netral, pH di bawah 7 bersifat asam, dan pH di atas 7 bersifat basa. Nilai pH dihitung sebagai logaritma negatif dari konsentrasi ion hidrogen: $pH = -\log[H^+]$. Semakin rendah nilai pH, semakin tinggi konsentrasi ion H^+ , yang menandakan tingkat keasaman yang lebih tinggi, sementara semakin tinggi pH, semakin tinggi konsentrasi ion hidroksida (OH^-) yang menunjukkan kebasaan (Sari et al., 2022).

Peran pH dalam reaksi kimia sangat penting karena pH dapat memengaruhi bentuk ionik, kelarutan, dan aktivitas berbagai senyawa kimia dalam larutan. Dalam konteks tanah dan lingkungan, pH memengaruhi proses adsorpsi, presipitasi, dan kompleksasi logam berat. Misalnya, pada pH rendah, logam berat cenderung lebih larut dan lebih mobile, sehingga lebih mudah diserap oleh tanaman atau mengalir ke air tanah. Sebaliknya, pada pH yang lebih tinggi, logam berat sering kali membentuk senyawa yang kurang larut dan lebih mudah mengendap, sehingga mobilitasnya dalam tanah berkurang (Sparks, 2003). Dengan demikian, pH berperan sebagai faktor pengendali penting dalam berbagai reaksi kimia, terutama yang berkaitan dengan lingkungan dan proses biogeokimia.

Pengaruh pH terhadap ionisasi dan ketersediaan logam dalam tanah

pH tanah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ionisasi dan ketersediaan logam, yang pada gilirannya menentukan mobilitas dan toksisitas logam berat di lingkungan. Pada pH rendah (kondisi asam), sebagian besar logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan nikel (Ni) cenderung lebih mudah larut dan terionisasi, sehingga mereka lebih tersedia dan bergerak bebas dalam larutan tanah. Hal ini meningkatkan risiko kontaminasi, karena logam-logam ini dapat diserap oleh akar tanaman atau meresap lebih dalam ke air tanah (Kabata-Pendias & Pendias, 2011). Sebaliknya, pada pH tinggi (kondisi basa), logam-logam berat lebih cenderung mengalami presipitasi atau mengikat dengan partikel tanah seperti oksida besi dan mineral tanah lainnya, yang mengurangi ketersediaan ion logam bebas. Kondisi ini menghambat mobilitas logam dan menurunkan risiko penyerapan logam oleh tanaman atau pencemaran air tanah. Misalnya, pada pH basa, ion logam Pb^{2+} cenderung membentuk senyawa yang lebih stabil, sehingga mobilitasnya berkurang. Selain itu, pada pH tinggi, logam berat dapat mengalami kompleksasi dengan ion hidroksida (OH^-), yang membentuk senyawa kurang larut sehingga ketersediaannya dalam larutan tanah menjadi terbatas (Sparks, 2003).

Hubungan antara pH, kapasitas tukar kation (CEC), dan daya ikat tanah terhadap logam

pH tanah, kapasitas tukar kation (CEC), dan daya ikat tanah terhadap logam memiliki hubungan erat dalam menentukan ketersediaan dan retensi logam berat di tanah. pH tanah adalah faktor yang memengaruhi CEC dan interaksi ion logam dengan permukaan tanah. Pada pH yang lebih tinggi (basa), muatan negatif pada permukaan tanah meningkat, sehingga meningkatkan daya tariknya terhadap kation logam, seperti Pb^{2+} , Cd^{2+} , dan Zn^{2+} . Sebaliknya, pada pH rendah, ion hidrogen (H^+) mendominasi permukaan tanah, yang menurunkan CEC dan daya ikat tanah terhadap logam berat karena banyaknya ion H^+ yang bersaing dengan logam berat untuk situs adsorpsi di tanah.

Kapasitas Tukar Kation (CEC), yaitu kemampuan tanah untuk mengadsorpsi dan menukar kation, memainkan peran utama dalam daya ikat tanah terhadap logam. Tanah dengan CEC tinggi, seperti tanah dengan kandungan lempung atau bahan organik tinggi, memiliki lebih banyak situs pertukaran untuk mengikat logam berat. Pada CEC tinggi, kation logam lebih stabil dalam fase padat dan tidak mudah larut ke dalam larutan tanah, yang mengurangi mobilitas logam tersebut. Namun, tingkat CEC yang tinggi hanya efektif dalam mengikat logam jika pH juga tinggi; pada pH rendah, daya ikat tanah terhadap logam berat menurun meskipun CEC tinggi karena kompetisi dengan ion H^+ .

Dengan demikian, hubungan antara pH dan CEC menunjukkan bahwa peningkatan pH dapat meningkatkan CEC dan daya ikat tanah terhadap logam berat, yang secara langsung berpengaruh terhadap retensi dan ketersediaan logam. Di tanah asam, logam berat lebih mobile dan bioavailable, sedangkan pada tanah dengan pH lebih tinggi dan CEC tinggi, logam lebih terkunci dalam tanah, mengurangi risiko pencemaran lingkungan (Sparks, 2003).

Mekanisme Mobilitas Logam Berat Terkait pH

Mobilitas logam berat dalam tanah dipengaruhi oleh berbagai proses kimia, termasuk adsorpsi, desorpsi, presipitasi, dan kompleksasi.

1. **Adsorpsi** adalah proses di mana ion logam melekat pada permukaan partikel tanah, terutama lempung dan bahan organik. Adsorpsi mengurangi mobilitas logam berat karena logam tetap terikat pada partikel tanah dan tidak mudah bergerak ke dalam larutan tanah. Proses ini sangat dipengaruhi oleh pH dan kapasitas tukar kation (CEC) tanah, di mana peningkatan pH dan CEC biasanya meningkatkan kapasitas tanah untuk mengadsorpsi logam berat (Sposito, 2008).
2. **Desorpsi** adalah kebalikan dari adsorpsi, di mana ion logam yang terikat dilepaskan kembali ke dalam larutan tanah. Proses ini meningkatkan mobilitas dan ketersediaan bio-logam berat dalam tanah. Desorpsi sering terjadi ketika kondisi lingkungan berubah, misalnya jika pH menurun, yang meningkatkan konsentrasi ion H^+ dan mendorong ion logam terdesorpsi dari partikel tanah.
3. **Presipitasi** adalah proses di mana ion logam bereaksi dengan anion seperti karbonat, fosfat, atau hidroksida dalam larutan tanah dan membentuk senyawa yang tidak larut. Proses presipitasi mengurangi mobilitas logam berat karena senyawa presipitat ini tidak larut dan tetap berada di tempatnya. Misalnya, pada pH basa, logam seperti timbal dan seng dapat membentuk endapan karbonat atau hidroksida yang stabil, mengurangi ketersediaan logam berat dalam tanah (Sparks, 2003).
4. **Kompleksasi** adalah proses di mana ion logam berinteraksi dengan ligan, seperti ion organik atau anorganik, membentuk kompleks yang stabil. Kompleksasi dapat meningkatkan atau menurunkan mobilitas logam berat, tergantung pada sifat kompleks yang terbentuk. Kompleks terlarut yang terbentuk dengan senyawa organik cenderung lebih mobile dan dapat terbawa ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam atau ke perairan, sementara kompleks tidak larut cenderung tetap di tanah. Kompleksasi dengan bahan organik seperti asam humat sering kali meningkatkan daya ikat logam di permukaan tanah, mengurangi mobilitasnya (Mautuka et al., 2022)

Pengaruh kondisi asam dan basa terhadap mobilitas logam berat

Kondisi asam dan basa pada tanah sangat mempengaruhi mobilitas logam berat karena perubahan pH mengubah bentuk kimia logam dan interaksinya dengan partikel tanah. Pada kondisi asam (pH rendah), tanah cenderung memiliki konsentrasi ion H^+ yang tinggi, yang bersaing dengan ion logam berat untuk situs adsorpsi di permukaan partikel tanah. Akibatnya, logam berat seperti Pb, Cd, dan Ni cenderung tetap dalam bentuk terlarut dan mobile, sehingga lebih mudah terserap oleh tanaman atau mengalir ke dalam air tanah. Kondisi asam juga mempercepat proses desorpsi, di mana logam-

logam yang sebelumnya terikat pada partikel tanah dilepaskan kembali ke dalam larutan, meningkatkan mobilitas dan potensi toksisitas logam tersebut (Sparks, 2003). Sebaliknya, pada kondisi basa (pH tinggi), banyak logam berat membentuk senyawa hidroksida atau karbonat yang tidak larut, yang mengurangi mobilitasnya. Sebagai contoh, logam seperti Pb^{2+} dan Zn^{2+} dapat bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) dan membentuk endapan yang stabil, mengunci logam-logam ini dalam bentuk yang tidak mudah larut. Selain itu, pada pH tinggi, peningkatan muatan negatif pada permukaan tanah meningkatkan daya tarik terhadap kation logam, sehingga lebih banyak logam berat yang teradsorpsi pada partikel tanah. Kondisi ini mengurangi ketersediaan biologi-logam berat dan risiko pencemaran, karena logam-logam ini lebih cenderung tertahan di tanah (Alina Kabata-Pendias (Eds.), 2012).

Studi teoretis tentang ikatan logam berat dengan mineral tanah pada berbagai nilai pH

Studi teoretis tentang ikatan logam berat dengan mineral tanah menunjukkan bahwa interaksi logam berat dengan permukaan mineral tanah sangat dipengaruhi oleh pH, yang mengatur jenis ikatan yang terbentuk antara logam dan komponen tanah seperti lempung, oksida besi, dan bahan organik. Pada pH rendah (kondisi asam), logam berat seperti Pb, Zn, dan Cd cenderung terlarut lebih banyak dan kurang teradsorpsi pada permukaan mineral karena kompetisi dengan ion H^+ yang melimpah. Ion H^+ menempati banyak situs ikatan di permukaan mineral, yang mengurangi jumlah situs yang tersedia untuk logam berat. Hal ini membuat logam berat lebih mudah bergerak di lingkungan tanah dan meningkatkan ketersediaan biologisnya.

Pada pH tinggi (kondisi basa), ion H^+ berkurang, yang memungkinkan logam berat lebih mudah teradsorpsi ke permukaan mineral tanah. Di lingkungan basa, logam berat lebih cenderung membentuk kompleks hidroksida atau berinteraksi dengan ion karbonat, yang membentuk senyawa tidak larut seperti $Pb(OH)_2$ atau $ZnCO_3$. Oksida besi dan lempung dengan muatan negatif juga lebih banyak terisi oleh logam berat pada pH tinggi, karena peningkatan daya tarik elektrostatis antara permukaan tanah bermuatan negatif dan ion logam bermuatan positif. Dengan demikian, logam berat cenderung lebih stabil dan terikat kuat dalam tanah pada pH tinggi, mengurangi mobilitas dan ketersediaannya bagi tanaman dan mikroorganisme (Sparks, 2003).

Pengaruh pH Terhadap Ekstraksi dan Pemulihan Logam Berat

pH tanah sangat relevan dalam metode remediasi tanah yang terkontaminasi logam berat karena pH memengaruhi kelarutan dan ketersediaan logam berat, yang pada gilirannya menentukan efektivitas proses pemulihan. Pengaturan pH merupakan strategi utama dalam teknik remediasi, karena perubahan pH memungkinkan logam berat lebih larut atau mengendap, sesuai kebutuhan. Pada kondisi asam, logam berat umumnya lebih mudah larut dan dapat diekstraksi dengan lebih mudah, sementara pada pH tinggi, logam berat cenderung mengendap sebagai hidroksida atau kompleks lainnya, yang membantu mengunci logam dalam tanah dan mengurangi ketersediaan biologi (Bradl, 2004).

Dalam fitoremediasi, pH tanah disesuaikan untuk meningkatkan serapan logam berat oleh tanaman tertentu yang memiliki toleransi tinggi terhadap logam. Pada

kondisi asam, logam-logam seperti Pb, Cd, dan Zn lebih mobile dan lebih mudah diserap oleh akar tanaman, yang memungkinkan tanaman tersebut menyerap logam berat dengan lebih efektif. Tanaman hiperakumulator seperti *Brassica juncea* dan *Populus deltoides* telah banyak digunakan untuk memulihkan tanah yang terkontaminasi dengan bantuan perubahan pH, yang mengoptimalkan serapan logam melalui akar tanaman (Shofiyani & Gusrizal, 2010).

Selain itu, penggunaan agen kimia seperti asam atau basa dapat digunakan untuk menyesuaikan pH dan meningkatkan kelarutan logam berat sehingga lebih mudah diekstraksi. Misalnya, penambahan asam untuk menurunkan pH dapat meningkatkan ketersediaan bio logam berat dan mempermudah ekstraksi menggunakan pencucian kimia atau pencucian larutan. Proses ini sering diterapkan dengan bahan tambahan seperti EDTA, yang membentuk kompleks dengan logam berat dalam larutan, memfasilitasi mobilitasnya untuk kemudian diekstraksi dari tanah. Demikian pula, kapur sering digunakan untuk meningkatkan pH tanah dan menurunkan mobilitas logam berat dengan membentuk senyawa yang lebih stabil dan tidak larut, mengurangi risiko pencemaran lebih lanjut (Wuana & Okieimen, 2011).

Studi Kasus dan Pembahasan

Penelitian empiris mengenai pengaruh pH terhadap mobilitas logam berat menunjukkan bahwa pH sangat berperan dalam menentukan ketersediaan, mobilitas, dan toksisitas logam berat di lingkungan tanah. Salah satu studi oleh Kabata-Pendias dan Pendias (2011) menunjukkan bahwa penurunan pH secara signifikan meningkatkan mobilitas logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd), terutama pada tanah lempung dan berpasir. Studi ini menemukan bahwa pada pH rendah, logam-logam ini lebih mobile karena peningkatan kelarutan dan berkurangnya adsorpsi pada permukaan tanah. Hasil penelitian ini sejalan dengan teori bahwa ion H^+ yang tinggi pada kondisi asam bersaing dengan logam berat untuk situs adsorpsi, sehingga logam lebih tersedia dalam larutan tanah dan lebih mudah bergerak ke lapisan bawah atau perairan terdekat.

Studi lain oleh McLean dan Bledsoe (1992) juga menemukan bahwa peningkatan pH melalui aplikasi kapur pada tanah yang terkontaminasi Cd dan Zn menyebabkan berkurangnya mobilitas kedua logam tersebut, karena logam-logam ini membentuk presipitat yang tidak larut atau teradsorpsi lebih kuat pada permukaan tanah yang bermuatan negatif. Pengendapan logam pada pH yang lebih tinggi ini mengurangi bioavailabilitasnya bagi tanaman, sehingga menurunkan risiko toksisitas. Pembahasan dari berbagai studi ini mendukung teori bahwa pH secara langsung memengaruhi mekanisme kimia seperti adsorpsi, desorpsi, presipitasi, dan kompleksasi, yang menentukan mobilitas logam berat. Temuan empiris ini memperkuat pendekatan remediasi dengan penyesuaian pH sebagai cara efektif untuk mengurangi mobilitas logam berat. Perubahan pH yang disengaja dalam skenario remediasi, seperti melalui aplikasi kapur atau asam, dapat menjadi strategi yang efektif untuk mengurangi pencemaran lingkungan dan risiko kesehatan yang diakibatkan oleh logam berat (Alina Kabata-Pendias (Eds.), 2012).

Kesimpulan dan Saran

Dari analisis teoritis dan hasil penelitian yang ada, dapat disimpulkan bahwa pH tanah merupakan faktor utama yang menentukan mobilitas, ketersediaan, dan toksisitas logam berat dalam lingkungan tanah. Pada pH rendah (kondisi asam), mobilitas logam berat seperti Pb, Cd, dan Zn meningkat, karena ion H^+ yang melimpah bersaing dengan logam untuk situs adsorpsi, menyebabkan logam-logam ini lebih mudah larut dan bergerak dalam larutan tanah. Sebaliknya, pada pH tinggi (kondisi basa), banyak logam berat mengalami pengendapan atau teradsorpsi lebih kuat pada permukaan tanah bermuatan negatif, yang mengurangi mobilitasnya dan menurunkan risiko pencemaran lingkungan.

Implikasi dari pemahaman ini sangat relevan untuk pengembangan strategi remediasi tanah yang terkontaminasi, serta untuk praktik pertanian yang berkelanjutan. Peningkatan atau penurunan pH tanah, baik melalui penggunaan kapur maupun agen asam, dapat dimanfaatkan untuk mengatur mobilitas logam berat dan mengurangi dampaknya pada ekosistem serta kesehatan manusia. Ke depannya, penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk mengoptimalkan teknik ini pada jenis tanah yang berbeda, serta untuk mengembangkan metode yang efektif dalam mengelola logam berat dalam praktik pertanian, khususnya dalam sistem pertanian organik yang mengandalkan bahan organik tinggi. Studi lanjutan juga perlu fokus pada pengaruh pH dalam interaksi logam dengan senyawa organik dan mikroorganisme tanah, yang memiliki dampak signifikan pada perilaku logam berat dalam ekosistem tanah.

Daftar Pustaka

- Aditya, T. W., Walida, H., Sepriani, Y., & Sitanggang, K. D. (2022). Analisis Kandungan Logam Berat dan Mikroba Fungsional Pada Kascing Dari Campuran Kotoran Ayam, Bonggol Pisang dan Ampas Tahu. *AGROVITAL: Jurnal Ilmu Pertanian*, 7(1), 28. <https://doi.org/10.35329/agrovital.v7i1.2829>
- Alina Kabata-Pendias (Eds.). (2012). Trace Elements in Soils and Plants. In CRC Press (fourth edi, Vol. 80). South African Association of Botanists. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2012.03.008>
- Bradl, H. (2004). Adsorption of Heavy Metal Ions on Soils and Soils Constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.005>
- Hindarwati, Y., Soeprbowati, T. R., Izzati, M., & Hadiyanto, H. (2023). Kontaminan Logam Berat (Pb, Cd, dan Cu) pada Tanah dari Pemupukan Berbasis Jerami Padi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 8–14. <https://doi.org/10.14710/jil.21.1.8-14>
- Hooda, P. (2010). *Trace Elements in Soils*. <https://doi.org/10.1002/9781444319477.ch1>
- Mautuka, Z. A., Astriana, M., & Martasiana, K. (2022). Pemanfaatan Biochar Tongkol Jagung Guna Perbaikan Sifat Kimia Tanah Lahan Kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1), 201–208. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5827375>
- Oktavian, P., Anas, M., Kasman, Sudiana, I. N., Safaani, J., & Agus, L. (2024). Studi Kajian Literatur: Pengaruh Keberadaan Logam Berat Terhadap Tingkat Kesuburan Tanah di Indonesia. *Einstein's: Research Journal of Applied Physics*, 2(1), 20–23. <https://doi.org/10.33772/einsteins.v2i1.645>

- Sari, F., Fitriyano, G., Syamsudin, Redjeki, A. S., & Hadikusuma, H. (2022). Pengaruh pH dan Waktu Terhadap Adsorpsi Logam Timbal (Pb) dengan Arang Aktif dari Gambas (*Luffa acutangula*) atau Oyong Kering. *Jurnal Konversi*, 11(1), 31–38.
- Shofiyani, A., & Gusrizal, G. (2010). DETERMINATION OF pH EFFECT AND CAPACITY OF HEAVY METALS ADSORPTION BY WATER HYACINTH (*Eichhornia crassipes*) BIOMASS. *Indonesian Journal of Chemistry*, 6(1), 56–60. <https://doi.org/10.22146/ijc.21774>
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. Elsevier Science. <https://books.google.co.id/books?id=ryt5ZkstckoC>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>