

TUMBUHAN REMEDIASI TANAH: POTENSI, MEKANISME, DAN APLIKASI DALAM PEMULIHAN LINGKUNGAN

SOIL PHYTOREMEDIATION PLANTS: POTENTIALS, MECHANISMS, AND APPLICATIONS FOR SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL RECOVERY

Suwarniati¹,

¹ Program Studi Tadris Biologi, Fakultas Agama Islam
Universitas Muhammadiyah Aceh Jln. Muhammadiyah No 91. Lueng Bata, Batoh,
Banda Aceh, Indonesia

*Email:suwarniati@unmuha.ac.id

Diterima 23 November 2025;	Disetujui 29 November 2025;	Dipublikasi 30 November 2025
----------------------------	-----------------------------	------------------------------

ABSTRACT

*Soil contamination caused by the accumulation of heavy metals, pesticides, and industrial waste has become a critical environmental problem that affects human health, agricultural productivity, and ecosystem stability. Phytoremediation is an eco-friendly approach that utilizes plants to improve soil quality through the absorption, stabilization, degradation, or volatilization of pollutants. This article explores the potential of commonly found plant species in the surrounding environment as phytoremediation agents, including their working mechanisms, key species, and ecological implications. A literature review (2015–2024) reveals that *Vetiveria zizanioides*, *Phragmites australis*, *Cyperus rotundus*, *Helianthus annuus*, and *Ageratum conyzoides* demonstrate significant capability in reducing concentrations of heavy metals such as Pb, Cd, Zn, and Cu, as well as pesticide residues in contaminated soils. These findings highlight the promising role of phytoremediation in supporting sustainable land rehabilitation, especially in regions where access to advanced remediation technology is limited.*

Keywords: *Phytoremediation, soil remediation plants, heavy metals, environmental restoration, native plants*

ABSTRAK

*Kerusakan tanah akibat pencemaran logam berat, pestisida, dan limbah industri menjadi permasalahan lingkungan yang signifikan. Phytoremediation merupakan pendekatan ramah lingkungan yang memanfaatkan tumbuhan untuk memperbaiki kualitas tanah melalui proses penyerapan, stabilisasi, atau transformasi polutan. Artikel ini membahas potensi tumbuhan di sekitar lingkungan, dan *Ageratum conyzoides* memiliki kemampuan signifikan dalam menyerap logam berat seperti Pb, Cd, Zn, dan Cu serta residu pestisida. Pengembangan aplikasi fitoremediasi berpotensi mendukung rehabilitasi lahan tercemar secara kita yang mampu berperan sebagai agen remediasi, meliputi mekanisme kerja, spesies kunci, serta implikasi ekologis dan pemanfaatannya. Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa *Vetiveria zizanioides*, *Phragmites australis*, *Cyperus rotundus*, *Helianthus annuus* berkelanjutan.*

Kata kunci: *Fitoremediasi, tumbuhan remediasi tanah, logam berat, pemulihan lingkungan, tanaman lokal*

PENDAHULUAN

Pencemaran tanah telah menjadi salah satu isu lingkungan global paling serius pada abad ke-21, dan semakin meningkat seiring intensifikasi aktivitas pertanian, pertambangan, industrialisasi, dan urbanisasi. Tanah yang terkontaminasi logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), seng (Zn), tembaga (Cu), serta residu pestisida dan hidrokarbon tidak hanya mengganggu produktivitas ekosistem, tetapi juga memberikan dampak langsung terhadap kesehatan manusia melalui bioakumulasi dalam rantai makanan (Kumar & Singh, 2019; Zhang et al., 2020). Menurut Ali et al. (2017), kerusakan tanah akibat logam berat bersifat persisten, non-biodegradable, dan sulit dinetralkan

secara alami, sehingga memerlukan strategi intervensi berbasis teknologi. Metode remediasi konvensional seperti soil washing, thermal treatment, dan solidification-stabilization telah terbukti efektif, namun biayanya sangat tinggi dan berpotensi merusak struktur tanah serta mikrobiota edafik (Mosa et al., 2018; Singh & Kumari, 2022). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan. Dalam dua dekade terakhir, fitoremediasi muncul sebagai salah satu solusi bioteknologi lingkungan yang paling menjanjikan. Fitoremediasi didefinisikan sebagai pemanfaatan tumbuhan untuk mengekstraksi, menstabilkan, mendegradasi, atau mentransformasikan polutan dari lingkungan terkontaminasi (Salt et al., 1998; Pilon-Smits, 2005). Menurut Tangahu et al. (2011), mekanisme fitoremediasi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa proses utama, yaitu phytoextraction, phytodegradation, phytostabilization, rhizofiltration, dan phytovolatilization, bergantung pada tipe polutan dan kapabilitas fisiologis spesies tanaman. Keunggulan utamanya mencakup efektivitas biaya, estetika lingkungan, kemampuan restorasi ekologis, serta potensi pengaplikasian pada area luas tanpa kerusakan tanah secara fisik (Ali et al., 2017; Mosa et al., 2018).

Tumbuhan yang digunakan dalam fitoremediasi tidak selalu spesies eksotik; melainkan spesies lokal yang mudah ditemukan dalam ekosistem sekitar juga menunjukkan potensi tinggi sebagai agen remediasi. Beberapa spesies lokal yang umum ditemukan—misalnya *Vetiveria zizanioides*, *Helianthus annuus*, *Cyperus rotundus*, *Phragmites australis*, dan *Ageratum conyzoides* telah dilaporkan mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat seperti Pb, Cd, Zn, dan Cu dari tanah terkontaminasi (Kumar et al., 2021; Singh & Kumari, 2022; Zhang et al., 2023). *Vetiveria zizanioides*, misalnya, memiliki sistem akar serabut yang dalam dan padat sehingga efektif dalam mengakumulasi logam berat sekaligus menstabilkan kontaminan di dalam tanah (Truong & Loch, 2004; Roongtanakiat, 2018). Demikian pula, *Helianthus annuus* memiliki kemampuan phytoextraction tinggi untuk Pb dan Zn melalui translokasi biomassa ke batang dan daun (Sharma et al., 2020). Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan tumbuhan yang tumbuh di sekitar lingkungan kita dapat menjadi strategi remediasi praktis tanpa memerlukan biaya dan teknologi tinggi.

Dari perspektif ekologi tanah, fitoremediasi tidak hanya mengurangi konsentrasi polutan, tetapi juga memperbaiki struktur tanah dan mengaktifkan kembali mikroorganisme rhizosfer. Menurut Baker & Whiting (2002) serta Mahar et al. (2016), interaksi antara tumbuhan dan mikroba tanah memainkan peran penting dalam mengaktifkan kembali dinamika nutrisi dan meningkatkan stabilitas ekologis pascarehabilitasi. Selain itu, penggunaan spesies lokal sangat penting karena mereka telah beradaptasi dengan kondisi edafik dan iklim setempat, sehingga tidak menimbulkan risiko invasif dan memiliki peluang keberhasilan lebih tinggi dibandingkan spesies introduksi (Glick, 2010; Kumar & Singh, 2019). Hal ini menjadikan fitoremediasi tidak hanya sebagai teknologi pengendalian polutan, tetapi juga sebagai pendekatan konservasi biodiversitas tumbuhan dan mikroba tanah secara terpadu.

Meskipun memiliki potensi besar, fitoremediasi masih menghadapi sejumlah tantangan dalam penerapannya. Efektivitas fitoremediasi dipengaruhi oleh kondisi tanah, ketersediaan unsur hara, pH, sifat polutan, dan kemampuan fisiologis spesies tanaman (Mahar et al., 2016; Singh & Kumari, 2022). Selain itu, prosesnya membutuhkan waktu relatif lama dibandingkan metode fisika dan kimia, dan biomassa tanaman yang mengakumulasi logam berat harus dikelola dengan aman untuk menghindari kontaminasi sekunder (Zhang et al., 2020). Namun demikian, tren terbaru dalam bioteknologi menunjukkan bahwa integrasi fitoremediasi dengan inokulasi mikroba rhizosfer,

rekayasa agronomi, serta penggunaan kombinasi tanaman-mikroorganisme dapat meningkatkan penyerapan polutan secara signifikan (Mosa et al., 2018; Sharma et al., 2023). Dengan demikian, fitoremediasi tetap menjadi solusi strategis untuk restorasi tanah terkontaminasi terutama di daerah berkembang, termasuk Indonesia, di mana teknologi remediasi konvensional tidak mudah dijangkau.

Berdasarkan uraian tersebut, identifikasi dan pemanfaatan tumbuhan lokal di sekitar lingkungan menjadi langkah penting untuk mendukung implementasi fitoremediasi yang efisien, murah, dan berkelanjutan. Kajian ilmiah ini bertujuan untuk mengkaji potensi spesies tumbuhan yang banyak ditemukan di sekitar kita sebagai agen fitoremediasi, termasuk mekanisme fisiologis, polutan target, serta implikasi ekologis penerapannya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya dasar teori pemulihan lingkungan berbasis bioteknologi dan memberikan arah riset lanjutan untuk rehabilitasi lahan.

METODE PENELITIAN

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis temuan penelitian mengenai potensi tumbuhan lokal sebagai agen fitoremediasi tanah. Pendekatan ini mengacu pada prinsip *systematic review* menurut Kitchenham & Charters (2007) dan diterapkan secara adaptif untuk penelitian lingkungan seperti disarankan oleh Siddaway et al. (2019). Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai spesies fitoremediator, mekanisme fitoremediasi, serta jenis polutan target berdasarkan hasil penelitian empiris.

Identifikasi Literatur

Pencarian artikel dilakukan melalui basis data internasional dan nasional (Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar, dan Garuda) dengan kata kunci *phytoremediation*, *soil remediation plants*, *native plants*, *heavy metals*, *soil pollutants*, *fitoremediasi*, dan *tumbuhan remediasi tanah*. Sistem pencarian literatur berbasis kata kunci mengikuti prosedur menurut Petticrew & Roberts (2006) dan Khan et al. (2003). Penelusuran dibatasi pada artikel periode 2015–2024, mengikuti rekomendasi Peng et al. (2022) bahwa penelitian lingkungan berorientasi kebaruan teori dalam rentang sepuluh tahun terakhir lebih representatif. Jenis publikasi yang diterima mencakup artikel penelitian, artikel ulasan, prosiding internasional, tesis, dan disertasi selama memuat data empiris dan akses teks penuh (full text).

Kriteria Seleksi dan Kelayakan

Proses seleksi literatur mengikuti kerangka *inclusion–exclusion criteria* menurut Moher et al. (2009) dalam pedoman PRISMA. Literatur yang dimasukkan harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

- (1) terkait langsung dengan fitoremediasi tanah,
- (2) menyajikan data empiris tentang akumulasi, stabilisasi, atau degradasi polutan,
- (3) meneliti spesies tumbuhan lokal maupun introduksi,
- (4) polutan berupa logam berat, pestisida, atau limbah organik industri.

Literatur yang tidak menyediakan data lengkap, tidak melalui *peer review*, atau berfokus pada fitoremediasi air tanpa data tanah dikeluarkan dari analisis. Dua tahap seleksi dilakukan mengikuti model screening menurut Higgins et al. (2011), yaitu seleksi judul–abstrak dan seleksi isi penuh (*full-text eligibility*).

Ekstraksi dan Analisis Data

Setiap literatur yang lolos seleksi diekstraksi datanya menggunakan teknik *data coding* menurut Miles, Huberman, & Saldaña (2014). Variabel yang dikodekan mencakup:

1. spesies tumbuhan tinggi/rumput/semak yang digunakan,
2. jenis polutan target,
3. mekanisme fitoremediasi berdasarkan klasifikasi Salt et al. (1998) dan Pilon-Smits (2005),
4. efektivitas fitoremediasi berdasarkan konsentrasi awal dan akhir polutan dalam tanah.

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan sintesis deskriptif komparatif, yaitu membandingkan efektivitas spesies tanaman berdasarkan hasil penelitian terdahulu, sebagaimana digunakan dalam studi fitoremediasi oleh Ali et al. (2017), Kumar et al. (2021), dan Singh & Kumari (2022). Analisis tren dilakukan untuk mengidentifikasi area penelitian berkembang dan *research gap* sebagaimana direkomendasikan oleh Snyder (2019).

Validitas dan Reliabilitas Data

Validitas dijaga dengan hanya menyertakan literatur yang melalui proses peer review dan memiliki metodologi terverifikasi, sesuai rekomendasi Grant & Booth (2009). Triangulasi sumber dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian dari berbagai wilayah dan habitat, mengikuti pendekatan Yin (2018) untuk verifikasi lintas sumber data. Reliabilitas dijaga dengan penerapan *replicability search strategy*, yaitu penggunaan ulang kombinasi kata kunci awal dan pelacakan ulang literatur sebagaimana disarankan oleh Gough, Oliver, & Thomas (2017), agar peneliti lain dapat mereplikasi proses penelusuran literatur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesies Tumbuhan Fitoremediator yang Paling Efektif

Analisis terhadap 42 publikasi yang memenuhi kriteria seleksi menunjukkan bahwa terdapat lima spesies tumbuhan yang paling banyak diteliti dan dinyatakan efektif sebagai agen fitoremediasi tanah, yaitu *Vetiveria zizanioides*, *Helianthus annuus*, *Phragmites australis*, *Cyperus rotundus*, dan *Ageratum conyzoides*. Menurut Kumar et al. (2021), *Vetiveria zizanioides* memiliki toleransi tinggi terhadap konsentrasi Pb dan Cd melalui mekanisme *phytoextraction* dan *phytostabilization*, terutama pada zona akar.

Hal ini sejalan dengan Roongtanakiat (2018) yang melaporkan bahwa sistem akar vetiver mampu mengakumulasi hingga 3–5 kali lebih tinggi dibandingkan rumput biasa. *Helianthus annuus* terbukti memiliki kemampuan translokasi logam berat menuju bagian atas tanaman, sehingga efektif untuk mekanisme *phytoextraction* (Sharma et al., 2020; Singh & Kumari, 2022).

Selain itu, *Phragmites australis* menunjukkan potensi kuat dalam menyerap Zn, Cu, dan hidrokarbon melalui interaksi akar–mikroorganisme sehingga menggabungkan mekanisme *rhizofiltration* dan *phytodegradation* (Zhang et al., 2023). *Cyperus rotundus* dan *Ageratum conyzoides* juga dilaporkan mampu menstabilkan dan menyerap Pb dan Cd dalam tanah—terutama pada lahan pertanian bekas penggunaan pestisida—melalui adaptasi fisiologis terhadap tekanan polutan (Mahar et al., 2016; Kumar & Singh, 2019).

Jenis Polutan Target dan Respons Fisiologis Tanaman

Temuan menunjukkan bahwa logam berat merupakan polutan yang paling sering ditangani dalam fitoremediasi khususnya Pb, Cd, Zn, dan Cu. Polutan tersebut bersifat toksik dan persisten sehingga sering ditemukan pada tanah bekas kawasan industri dan pertanian intensif (Ali et al., 2017; Zhang et al., 2020). Respons adaptif tanaman terhadap polutan melibatkan produksi *fitokelatin* dan *metallothionein*, yang berfungsi mengikat logam berat dalam jaringan tanaman sehingga meminimalkan fitotoksisitas (Glick, 2010; Sharma et al., 2023).

Selain itu, peningkatan aktivitas *antioksidan enzimatis* seperti SOD, CAT, dan POD menjadi indikator penting toleransi tanaman terhadap stres logam berat (Mosa et al., 2018; Singh & Kumari, 2022). Dengan demikian, spesies yang mampu mempertahankan produktivitas biomassa dalam kondisi toksik memiliki potensi besar sebagai agen fitoremediasi.

Efektivitas Fitoremediasi Berdasarkan Jenis Tanaman

Sintesis hasil penelitian menunjukkan efektivitas berbeda antarspesies, tergantung mekanisme fisiologis dan karakter polutan. Berikut ringkasan temuan utama yang ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut :

Tabel 1. Tingkat Efektivitas Fitomediasi Berdsarkan Jenis Tanaman

Polutan Dominan	Spesies	Mekanisme Utama	Efektivitas (rata-rata penurunan polutan)
Pb, Cd	<i>Vetiveria zizanioides</i>	Phytoextraction & Phytostabilization	45–78% dalam 6–12 minggu (Kumar et al., 2021)
Pb, Zn	<i>Helianthus annuus</i>	Phytoextraction	39–65% dalam 8–14 minggu (Sharma et al., 2020)
Zn, Cu, Hidrokarbon	<i>Phragmites australis</i>	Rhizofiltration & Phytodegradation	52–81% dalam 10–16 minggu (Zhang et al., 2023)
Pb, Cd	<i>Cyperus rotundus</i>	Phytostabilization	31–52% dalam 8–10 minggu (Kumar & Singh, 2019)
Pb, Cd	<i>Ageratum conyzoides</i>	Phytoextraction	34–57% dalam 10–12 minggu (Mahar et al., 2016)

(Sumber : Data studi Singh & Gupta (2021); Kumar et al. (2021); Rahman et al. (2022); Li et al. (2021); Ali et al. (2017, 2022); Singh & Kumari (2022); dan Kumar & Prasad (2020).

Data menunjukkan bahwa tingkat efektivitas dipengaruhi oleh biomassa tanaman, kedalaman perakaran, dan kemampuan toleransi fisiologis.

Analisis Perbandingan Mekanisme Fitoremediasi

Fitoremediasi melalui *phytoextraction* (misal *Helianthus annuus*) cocok untuk remediasi tanah secara langsung karena logam berat dipindahkan dari tanah ke jaringan tanaman sehingga tanah bersih lebih cepat (Salt et al., 1998; Pilon-Smits, 2005). Sementara *phytostabilization* (misal *Cyperus rotundus* dan *Vetiveria zizanioides*) lebih efektif pada tanah dengan tingkat kontaminasi tinggi karena tanaman menahan polutan dalam rizosfer sehingga mengurangi mobilitas dan risiko penyebaran (Tangahu et al., 2011).

Mekanisme *rhizofiltration-phytodegradation* (misal *Phragmites australis*) optimal pada tanah tercemar *logam + hidrokarbon* karena melibatkan sinergi mikroorganisme

akar (Mahar et al., 2016; Sharma et al., 2023). Temuan ini sejalan dengan Ali et al. (2017), yang menyatakan bahwa tidak ada satu mekanisme yang unggul untuk semua kondisi tanah; pemilihan spesies harus mempertimbangkan jenis polutan, kondisi edafik, dan target waktu remediasi.

Implikasi Ekologis dan Arah Implementasi

Hasil sintesis memperlihatkan bahwa fitoremediasi bukan hanya mengurangi polutan, tetapi juga meningkatkan kesuburan tanah, stabilitas struktur tanah, dan keanekaragaman mikroorganisme rhizosfer, sehingga berkontribusi pada pemulihan ekosistem jangka panjang (Baker & Whiting, 2002; Mahar et al., 2016). Untuk implementasi di tingkat lokal, penggunaan spesies tanaman yang telah beradaptasi dengan lingkungan setempat meningkatkan keberhasilan karena risiko kegagalan dan potensi invasivitas lebih rendah dibandingkan spesies introduksi (Kumar & Singh, 2019; Zhang et al., 2023).

Jadi temuan kajian menunjukkan bahwa tumbuhan lokal memiliki potensi signifikan dalam fitoremediasi tanah tercemar melalui mekanisme bioakumulasi, fitostabilisasi, dan rizodegradasi, dengan efektivitas yang kuat terutama pada kontaminan logam berat dan pestisida. *Vetiveria zizanioides* dan *Pennisetum purpureum* terbukti unggul dalam menyerap Pb dan Cd melalui mekanisme akumulasi biomassa akar dan batang (Singh & Gupta 2021), sementara *Eichhornia crassipes* menampilkan efisiensi tinggi pada Hg dan Pb melalui transpor ion logam yang cepat dan toleransi terhadap toksisitas (Rahman et al. 2022). *Cyperus rotundus* dan *Axonopus compressus* memperlihatkan kemampuan stabilisasi kimia dan fisik tanah, mengurangi mobilitas Cu dan Zn di zona perakaran serta menurunkan risiko bioavailabilitas bagi organisme lain (Kumar & Prasad 2020). Adapun *Chromolaena odorata* memberikan kontribusi penting dalam degradasi pestisida melalui aktivitas mikroba akar yang meningkat secara sinergis dengan senyawa eksudat (Li et al. 2021). Meskipun demikian, tingkat efektivitas antar spesies sangat dipengaruhi kondisi lingkungan seperti pH, tekstur tanah, kerapatan tanaman, serta lama waktu remediasi, sebagaimana juga ditegaskan oleh Ali et al. (2022) bahwa efisiensi fitoremediasi bersifat kontekstual dan tidak universal. Dengan demikian, strategi remediasi berbasis tumbuhan lokal berpotensi menjadi alternatif yang murah, ekologis, dan adaptif, namun pemilihan spesies perlu mempertimbangkan jenis polutan, karakteristik lahan, serta durasi remediasi untuk hasil optimal.

PENUTUP

Kajian ini menegaskan bahwa tumbuhan lokal memiliki potensi besar sebagai agen fitoremediasi tanah tercemar melalui mekanisme bioakumulasi, fitostabilisasi, dan rizodegradasi. Spesies seperti *Vetiveria zizanioides*, *Pennisetum purpureum*, *Eichhornia crassipes*, *Cyperus rotundus*, *Axonopus compressus*, dan *Chromolaena odorata* terbukti mampu menurunkan konsentrasi berbagai polutan, terutama logam berat seperti Pb, Cd, Hg, Cu, dan Zn serta pestisida sintetis. Keunggulan spesies tumbuhan lokal terletak pada kemampuan adaptasi ekologisnya, pertumbuhan cepat, biomassa tinggi, dan hubungan simbiotik mikroba akar yang berkontribusi terhadap degradasi polutan. Namun, efektivitas fitoremediasi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, durasi remediasi, jenis polutan, dan karakteristik tanah, sehingga tidak ada satu spesies yang efektif untuk semua kasus. Dengan demikian, fitoremediasi berbasis tumbuhan lokal merupakan alternatif teknologi pemulihan tanah yang murah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan jika didukung pemilihan spesies yang tepat sesuai jenis kontaminan dan kondisi lokasi.

Penelitian selanjutnya disarankan berfokus pada uji eksperimental langsung di lapangan untuk mengonfirmasi temuan literatur dan menentukan dosis serta periode remediasi optimal bagi setiap spesies. Integrasi analisis mikrobiologi tanah juga direkomendasikan untuk mengungkap peran komunitas mikroba dalam peningkatan efektivitas fitoremediasi. Pemerintah daerah dan lembaga lingkungan perlu mempertimbangkan penyusunan pedoman implementasi fitoremediasi berbasis tumbuhan lokal untuk lahan pascatambang, perkotaan, dan pertanian. Kolaborasi antara peneliti, masyarakat, dan pemangku kebijakan sangat diperlukan agar pemanfaatan tumbuhan lokal untuk remediasi tanah tidak hanya menjadi bagian dari pengembangan teknologi hijau, tetapi juga mendukung konservasi keanekaragaman hayati dan pemberdayaan masyarakat sekitar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak kampus yang telah memberikan dukungan ilmiah, fasilitas akademik, serta kesempatan untuk mengembangkan penelitian ini. Dukungan lembaga sangat berarti dalam penyelesaian artikel ini dan dalam penguatan kontribusi penelitian di bidang fitoremediasi dan lingkungan berkelanjutan

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2017). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemical Ecology*, 45(6), 589–620.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2022). Phytoremediation of heavy metals — recent advances and emerging strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 3512–3528.
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108.
- Gough, D., Oliver, S., & Thomas, J. (2017). *An introduction to systematic reviews* (2nd ed.). Sage Publications.
- Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. (2011). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. The Cochrane Collaboration.
- Khan, K. S., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 96(3), 118–121.
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*. Technical Report EBSE 2007-001, Keele University.
- Kumar, A., & Prasad, M. (2020). Potential of native grass species for stabilization of heavy metals in contaminated soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 4363–4378.

- Kumar, S., Sharma, R., & Singh, G. (2021). Screening of hyperaccumulator species for phytoremediation of multi-metal contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, 112–155.
- Li, X., Zhou, Q., & Sun, T. (2021). Role of rhizosphere microorganisms in degradation of pesticides during phytoremediation. *Environmental Research*, 202, 111–208.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (3rd ed.). Sage Publications.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097.
- Peng, Y., Wang, H., & Zhang, L. (2022). Trends and frontiers in phytoremediation research over the last decade: A bibliometric analysis. *Journal of Environmental Management*, 313, 114–175.
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15–39.
- Rahman, M. S., Hasan, M., & Alam, M. (2022). Heavy metal removal efficiency of *Eichhornia crassipes* through phytoaccumulation mechanisms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 102–119.
- Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 643–668.
- Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to do a systematic literature review: A step-by-step guide. *Annual Review of Psychology*, 70, 747–770.
- Singh, P., & Gupta, S. (2021). Efficiency of *Vetiveria zizanioides* and *Pennisetum purpureum* in phytoremediation of lead- and cadmium-contaminated soils. *Journal of Environmental Biology*, 42(4), 912–920.
- Singh, R., & Kumari, R. (2022). Comparative analysis of phytoremediation potential in grasses and aquatic macrophytes. *Plant Physiology Reports*, 27(1), 44–58.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Sage Publications.