

---

**MENINGKATKAN FITOREMEDIASI TANAH MENGGUNAKAN TANAMAN  
PISANG (MUSA SPP.)**

Muhammad Adlan Nur Abadia<sup>1</sup>, Lolita Endang Susilowati<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universitas Mataram

Email: [adlanoor94@gmail.com](mailto:adlanoor94@gmail.com)

**Abstrak:** Pencemaran tanah oleh logam berat merupakan masalah lingkungan global yang semakin serius akibat aktivitas industri, pertambangan, dan pertanian intensif. Fitoremediasi hadir sebagai teknologi ramah lingkungan dan ekonomis untuk mengatasi kontaminasi tersebut. Tanaman pisang (*Musa spp.*) menunjukkan potensi luar biasa sebagai agen fitoremediasi karena kemampuannya mengakumulasi logam berat serta biomassa yang melimpah. Literatur review ini menyintesis berbagai penelitian mengenai strategi peningkatan kemampuan fitoremediasi tanaman pisang. Hasil sintesis menunjukkan bahwa pengaturan spektrum cahaya putih pada kultur tunas pisang dapat meningkatkan biomassa hingga 1,5 kali lipat tanpa mengurangi kapasitas remediasi tembaga (Kok & Irawati, 2020). Selain itu, pemanfaatan limbah pisang sebagai bio-adsorben terbukti sangat efektif, dengan kulit pisang mampu mereduksi konsentrasi kromium hingga 98,93% (Kaniyappan, Rathinasamy, & Manivanan, 2022), serta biochar dari batang pisang efektif mengadsorpsi logam Pb, Cd, Cu, dan Mn melalui mekanisme pertukaran ion dan kompleksasi permukaan (Chen dkk., 2025). Review ini menyimpulkan bahwa optimalisasi fitoremediasi menggunakan tanaman pisang dapat dicapai melalui pendekatan terintegrasi yang menggabungkan rekayasa kondisi tumbuh dan pemanfaatan limbah pisang sebagai pembenah tanah.

**Kata Kunci:** Fitoremediasi, *Musa Spp.*, Logam Berat, Biochar.

*Abstract:* Soil pollution by heavy metals is an increasingly serious global environmental problem due to industrial, mining, and intensive agricultural activities. Phytoremediation presents itself as an environmentally friendly and economical technology to address this contamination. Banana plants (*Musa spp.*) show extraordinary potential as phytoremediation agents due to their ability to accumulate heavy metals and their abundant biomass. This literature review synthesizes various studies on strategies to enhance the phytoremediation capabilities of banana plants. The results of the synthesis indicate that adjusting the white light spectrum in banana shoot cultures can increase biomass up to 1.5-fold without reducing copper remediation capacity (Kok & Irawati, 2020). Furthermore, the use of banana waste as a bioadsorbent has proven highly effective, with banana peels being able to reduce chromium concentrations by up to 98.93% (Kaniyappan, Rathinasamy, & Manivanan, 2022), and biochar from banana stems is effective in adsorbing Pb, Cd, Cu, and Mn through ion exchange and surface complexation mechanisms (Chen et al., 2025). This review concludes that optimizing phytoremediation using banana plants can be achieved through an integrated approach that combines engineered growing conditions and the use of banana waste as a soil conditioner.

**Keywords:** *Phytoremediation, Musa Spp., Heavy Metals, Biochar.*

## PENDAHULUAN

Kontaminasi logam berat pada tanah dan air merupakan masalah lingkungan global yang semakin serius. Logam seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), kromium (Cr), dan tembaga (Cu) bersifat toksik, persisten, dan tidak terdegradasi di lingkungan, sehingga berpotensi masuk ke dalam rantai makanan dan membahayakan kesehatan manusia (Wang dkk., 2024). Menurut Wang dkk. (2024) yang dipublikasikan di *Journal of Hazardous Materials*, sumber utama pencemaran logam berat di tanah pertanian meliputi deposisi atmosfer, pupuk kandang, pupuk mineral, dan pestisida, di mana praktik pertanian menyumbang 69,7% hingga 86,7% dari total masukan logam berat ke dalam tanah. Dampak pencemaran logam berat terhadap kesehatan manusia sangat serius, di mana Briffa dkk (2020) dalam *Heliyon* melaporkan bahwa toksisitas logam berat dapat menyebabkan berbagai penyakit, termasuk karsinogenisitas, gangguan saraf, dan kerusakan otak. Berbagai metode konvensional seperti pencucian tanah (*soil washing*), solidifikasi, dan ekstraksi elektrokinetik telah dikembangkan, namun Emamverdian dkk. (2015) mengkritisi bahwa metode-metode tersebut umumnya mahal, mengganggu struktur tanah, dan kurang ramah lingkungan.

Sebagai alternatif, fitoremediasi muncul sebagai solusi inovatif yang memanfaatkan tanaman untuk menyerap, mendegradasi, atau menstabilkan polutan di tanah, dengan keunggulan biaya operasional rendah, ramah lingkungan, dan tidak merusak struktur tanah (Emamverdian dkk., 2015; Kok & Irawati, 2020). Tanaman pisang (*Musa spp.*) menarik perhatian sebagai agen fitoremediasi potensial karena memiliki kemampuan beradaptasi tinggi di berbagai kondisi lahan, biomassa besar sehingga kapasitas akumulasi polutan tinggi, serta siklus hidup yang relatif cepat (Kok & Irawati, 2020). Penelitian oleh Kumar (2014) mengevaluasi kemampuan *Musa spp.* dalam menyerap logam Cd, Pb, Cr, dan Ni dari tanah terkontaminasi sludge, dan hasilnya menunjukkan bahwa tanaman pisang memiliki kapasitas penyerapan yang lebih tinggi untuk Pb dan Cd dibandingkan logam lainnya, mengindikasikan bahwa pisang dapat direkomendasikan untuk ditanam di area tercemar logam-logam tersebut.

Namun demikian, efektivitas fitoremediasi oleh tanaman pisang masih perlu ditingkatkan

untuk aplikasi skala lapangan. Kok & Irawati (2020) menekankan bahwa optimalisasi kondisi tumbuh, seperti pengaturan spektrum cahaya, dapat meningkatkan produksi biomassa tanaman sekaligus mempertahankan kapasitas akumulasi logam. Sementara itu, pendekatan sirkular yang mengubah limbah pisang menjadi biochar juga terbukti sangat efektif sebagai strategi peningkatan remediasi (Chen dkk., 2025; Diksha dkk., 2025; Kaniyappan dkk. 2022). Berdasarkan latar belakang tersebut, literatur review ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mensintesis berbagai strategi peningkatan kemampuan fitoremediasi tanaman pisang berdasarkan penelitian-penelitian terkini, mencakup aspek rekayasa kondisi tumbuh (spektrum cahaya) dan pemanfaatan limbah pisang (kulit, batang, tandan) sebagai agen remediasi, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi fitoremediasi yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan berbasis tanaman pisang.

#### **METODE PENELITIAN**

Review ini disusun dengan metode naratif sintesis berdasarkan sumber-sumber ilmiah yang relevan. Pencarian literatur dilakukan melalui basis data akademik seperti ScienceDirect, PubMed, CORE, dan Google Scholar dengan kata kunci "Musa paradisiaca phytoremediation", "banana biochar heavy metals", "LED banana shoot culture", "banana peel adsorption", dan "heavy metal soil contamination". Sumber yang digunakan mencakup artikel jurnal internasional terindeks (Scopus, SCI, ESCI) yang dipublikasikan dalam rentang waktu 2014-2025 untuk memastikan cakupan yang komprehensif sekaligus aktual. Kriteria inklusi meliputi: (1) penelitian yang berfokus pada tanaman pisang (*Musa spp.*) atau limbah pisang, (2) variabel yang diukur terkait fitoremediasi atau adsorpsi logam berat, dan (3) publikasi dalam jurnal peer-reviewed. Dapat dilihat Tabel 1. setelah melalui proses skrining, terpilih 8 artikel utama yang menjadi fokus sintesis dalam review ini, termasuk karya dari Kok & Irawati (2020), Kaniyappan dkk (2022), Chen dkk. (2025), Diksha dkk. (2025), Wang dkk. (2024), Briffa dkk. (2020), Gall dkk. (2015), serta Emamverdian dkk. (2015).

**Tabel 1. Analisis Pencarian Literatur**

No	Artikel Utama yang Terseleksi	Rentang Tahun	Hasil Penelitian
----	-------------------------------	---------------	------------------

1	Chen dkk. (2025)	2014-2025	Biochar batang pisang (BC) mampu mengadsorpsi logam Pb(II), Cd(II), Cu(II), dan Mn(II) dengan kapasitas adsorpsi optimal pada pH 6. Proses adsorpsi didominasi mekanisme kemisorpsi monolayer dengan multi-mekanisme (pertukaran ion, presipitasi mineral, kompleksasi gugus fungsi, interaksi kation- $\pi$ ). BC menunjukkan selektivitas tertinggi untuk Pb(II) dan setelah 5 siklus penggunaan masih mempertahankan removal 40%-60%.
2	Wang dkk. (2024)	2014-2025	Sumber utama pencemaran logam berat di tanah pertanian meliputi deposisi atmosfer, pupuk kandang, pupuk mineral, dan pestisida. Praktik pertanian menyumbang 69,7% hingga 86,7% dari total masukan logam berat ke dalam tanah. Logam berat yang paling dominan mencemari tanah pertanian adalah Cd, Pb, dan Cu.
3	Briffa, Sinagra, & Blundell (2020)	2014-2025	Toksistas logam berat (Pb, Cd, Cr, Hg, As) dapat menyebabkan berbagai penyakit pada manusia termasuk karsinogenisitas (kanker paru-paru, hati, ginjal), gangguan saraf (penurunan IQ, neuropati perifer), kerusakan otak (ensefalopati), gangguan ginjal (nefropati toksik), serta gangguan sistem reproduksi dan perkembangan janin.
4	Diksha dkk. (2025)	2014-2025	Biochar kulit pisang mampu menghilangkan nikel (Ni) dan kromium (Cr) dari lindi TPA dengan efisiensi 98,76%-98,96% untuk Ni dan 99,71%-99,77% untuk Cr pada suhu 30°C selama 15 menit. Kapasitas adsorpsi maksimum: Ni $1,15 \times 10^{-5}$ - $5,27 \times 10^{-6}$ mg/g, Cr $1,05 \times 10^{-5}$ - $6,76 \times 10^{-6}$ mg/g. Biochar kulit pisang merupakan adsorben murah yang ekonomis untuk aplikasi skala luas.
5	Gall, Boyd, & Rajakaruna (2015)	2014-2025	Transfer logam berat melalui jaring-jaring makanan terestrial terjadi melalui tiga jalur utama: (1) tanah-tumbuhan-herbivora, (2) tanah-organisme tanah-predator, dan (3) konsumsi langsung partikel tanah. Tanaman hiperakumulator dapat memindahkan logam ke konsumen, namun beberapa herbivora menunjukkan mekanisme detoksifikasi seperti metalothionein dan sequestrasi di eksoskeleton.
6	Kok & Irawati (2020)	2014-2025	Cahaya putih (LED) menghasilkan produksi biomassa kultur tunas <i>Musa paradisiaca</i> 1,5 kali lebih tinggi dibandingkan cahaya merah dan biru. Tidak terdapat perbedaan signifikan konsentrasi tembaga dalam biomassa antar ketiga perlakuan cahaya. Kultur tunas mampu mereduksi ion Cu dari media pertumbuhan sebesar 34-58%. Cahaya putih paling unggul untuk remediasi tembaga.
7	Emamverdian dkk. (2015)	2014-2025	Mekanisme toksistas logam berat pada tanaman meliputi: (1) kerusakan integritas membran sel melalui peroksidasi lipid, (2) peningkatan produksi ROS (stres oksidatif), (3) ketidakseimbangan serapan nutrisi esensial, (4) penurunan aktivitas fotosintesis akibat degradasi klorofil, (5)

			penghambatan morfologi (pemanjangan akar, tinggi tanaman). Tanaman merespon dengan mekanisme toleransi seperti sintesis fitokhelatin, metalotionein, dan enzim antioksidan.
8	Kaniyappa n, Rathinasa my, & Manivanan (2022)	2014-2025	Bubuk kulit pisang ( <i>Musa paradisiaca</i> ) mampu mereduksi konsentrasi kromium (Cr) dari air limbah industri di Ranipet, India sebesar 98,93% (Stasiun 1), 96,16% (Stasiun 2), dan 96,5% (Stasiun 3). Analisis GC-MS menunjukkan perubahan profil fitokimia kulit pisang setelah adsorpsi (munculnya senyawa seperti Acetic Acid 1-Methylethyl Ester, DL-Glyceraldehyde Dimer, N-Hexadecanoic Acid) yang disebabkan oleh adsorpsi ion kromium.
9	Kumar (2014)	2014-2025	<i>Musa paradisiaca</i> L. memiliki kapasitas penyerapan ( <i>scavenging capacity</i> ) lebih tinggi untuk timbal (Pb) dan kadmium (Cd) dibandingkan kromium (Cr) dan nikel (Ni) dari tanah terkontaminasi limbah sludge. Tanaman pisang direkomendasikan untuk ditanam di area tercemar logam Pb dan Cd sebagai agen fitoremediasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Kemampuan Fitoremediasi Tanaman Pisang*

#### **1. Kapasitas Akumulasi Logam Berat oleh Tanaman Pisang**

Pembahasan dimulai dengan evaluasi terhadap kapasitas alami tanaman pisang dalam mengakumulasi logam berat. Berdasarkan temuan Kumar (2014), tanaman pisang (*Musa paradisiaca* L.) menunjukkan kemampuan yang tidak merata dalam menyerap berbagai jenis logam. Logam timbal (Pb) dan kadmium (Cd) ditemukan terakumulasi lebih tinggi dibandingkan kromium (Cr) dan nikel (Ni). Hal ini mengindikasikan adanya selektivitas fisiologis pada sistem perakaran dan transportasi logam dalam jaringan tanaman pisang. Kemampuan yang lebih baik terhadap Pb dan Cd kemungkinan disebabkan oleh kemiripan sifat ionik kedua logam tersebut dengan ion nutrisi esensial (seperti kalsium dan seng), sehingga lebih mudah ditranspor melalui membran sel. Implikasi praktisnya, pisang direkomendasikan untuk ditanam pada lahan yang tercemar Pb dan Cd, sementara untuk Cr dan Ni diperlukan strategi tambahan karena kapasitas serapannya lebih rendah.

Sementara itu, penelitian Kok & Irawati (2020) memperkuat bukti tersebut dengan menunjukkan bahwa bahkan dalam sistem kultur tunas aseptik, pisang mampu mereduksi ion tembaga (Cu) dari media pertumbuhan. Akumulasi Cu dalam biomassa meningkat seiring

pertumbuhan tanaman, membuktikan bahwa kemampuan fitoremediasi sudah terbentuk sejak fase awal perkembangan. Kedua penelitian ini secara kolektif menegaskan bahwa *Musa* spp. memiliki potensi sebagai agen fitoremediasi, terutama untuk logam Pb, Cd, dan Cu. Namun, kapasitas ini bersifat spesifik terhadap jenis logam, sehingga aplikasi di lapangan harus mempertimbangkan profil pencemaran lahan target.

## 2. Dampak Logam Berat terhadap Fisiologi Tanaman

Meskipun memiliki kapasitas akumulasi, tanaman pisang tetap rentan terhadap efek toksik dari logam berat yang diserapnya. Emamverdian dkk. (2015) menjelaskan bahwa paparan logam berat memicu serangkaian gangguan fisiologis: peroksidasi lipid yang merusak integritas membran sel, produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang menyebabkan stres oksidatif, kompetisi dengan ion nutrisi esensial, degradasi klorofil yang menurunkan fotosintesis, serta penghambatan morfologi seperti pemanjangan akar dan tinggi tanaman. Gall dkk. (2015) menambahkan bahwa meskipun tanaman memiliki mekanisme toleransi (misalnya, *metal sequestration* di vakuola atau produksi *phytochelatins*), akumulasi dalam konsentrasi tinggi pada akhirnya tetap mengganggu fungsi normal.

Dari kedua penjelasan ini, dapat disimpulkan bahwa strategi peningkatan fitoremediasi tidak bisa hanya berfokus pada memaksimalkan akumulasi logam. Justru yang lebih penting adalah melindungi tanaman dari efek toksik tersebut melalui optimalisasi kondisi lingkungan (misalnya cahaya, pH, nutrisi) atau pemanfaatan agen hayati (misalnya mikoriza atau bakteri pendukung). Tanpa perlindungan yang memadai, akumulasi logam yang tinggi justru dapat menyebabkan kematian tanaman sebelum remediasi mencapai target yang diinginkan.

### *Strategi Peningkatan Fitoremediasi*

#### A. Rekayasa Kondisi Lingkungan: Pengaturan Spektrum Cahaya

Salah satu strategi inovatif yang terbukti efektif adalah rekayasa spektrum cahaya. Kok & Irawati (2020) membandingkan tiga jenis lampu LED (putih, merah, biru) pada kultur tunas pisang yang terpapar tembaga. Hasilnya menunjukkan tiga temuan penting. *Pertama*, cahaya putih menghasilkan produksi biomassa sekitar 1,5 kali lebih tinggi dibandingkan cahaya merah dan biru. Hal ini karena cahaya putih mengandung spektrum lengkap (termasuk merah dan biru) yang dibutuhkan untuk fotosintesis dan fotomorfogenesis. *Kedua*, tidak ada perbedaan signifikan pada konsentrasi tembaga per gram biomassa antar ketiga perlakuan. Artinya,

kapasitas akumulasi logam per jaringan tanaman tidak terganggu oleh perbedaan spektrum. *Ketiga*, secara keseluruhan, cahaya putih paling unggul untuk total remediasi tembaga karena biomassa yang lebih besar menyediakan lebih banyak jaringan untuk menyimpan logam.

Pembahasan lebih lanjut: temuan ini memiliki implikasi praktis yang penting. Di laboratorium atau rumah kaca, intensitas dan kualitas cahaya dapat direkayasa untuk memaksimalkan pertumbuhan tanpa mengorbankan kemampuan akumulasi. Dengan kata lain, peningkatan total kapasitas remediasi dicapai melalui peningkatan biomassa, bukan melalui peningkatan konsentrasi logam per gram. Ini adalah pendekatan yang lebih aman bagi tanaman karena menghindari risiko toksisitas yang tinggi. Namun, perlu dicatat bahwa penelitian ini masih pada skala kultur tunas (*in vitro*). Validasi pada tanaman dewasa di skala rumah kaca atau lapangan masih diperlukan, mengingat respons fisiologis terhadap cahaya dapat berubah seiring fase pertumbuhan.

## **B. Pemanfaatan Kulit Pisang sebagai Bio-adsorben**

Strategi berikutnya yang lebih aplikatif adalah penggunaan limbah kulit pisang sebagai bio-adsorben. Kaniyappan dkk. (2022) mendemonstrasikan bahwa bubuk kulit pisang mampu menurunkan konsentrasi kromium (Cr) di air limbah industri hingga 98,93%. Tingkat efisiensi yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa kulit pisang, yang selama ini dianggap limbah, memiliki potensi luar biasa sebagai adsorben alami. Analisis GC-MS mengungkap bahwa keberhasilan adsorpsi disebabkan oleh keberadaan senyawa fitokimia seperti asam heksadekanoat, kolesterol hidroksi, dan berbagai ester yang berperan sebagai gugus pengikat logam. Setelah proses adsorpsi, profil fitokimia berubah secara signifikan, membuktikan bahwa senyawa-senyawa tersebut terlibat langsung dalam pengikatan ion Cr.

Pembahasan kritis: keunggulan utama strategi ini adalah kesederhanaan dan keberlanjutannya. Tidak diperlukan teknologi canggih seperti pirolisis (yang membutuhkan suhu tinggi); cukup dengan mengeringkan dan menghaluskan kulit pisang, sudah diperoleh adsorben yang sangat efektif. Dari perspektif ekonomi sirkular, ini mengubah limbah pengolahan pisang (misalnya dari industri keripik pisang atau makanan olahan) menjadi produk bernilai tambah. Namun, keterbatasannya adalah bahwa bubuk kulit pisang lebih cocok untuk aplikasi *ex situ* (misalnya pengolahan air limbah di bak reaktor) dibandingkan untuk remediasi lahan terbuka, karena bentuk bubuk sulit diaplikasikan dan dapat terbawa air hujan.

**C. Biochar dari Limbah Pisang untuk Adsorpsi Logam Berat**

Perkembangan lebih lanjut adalah konversi limbah pisang menjadi biochar melalui pirolisis, yang menghasilkan material berpori dengan luas permukaan tinggi.

- **Biochar Batang Pisang (Chen dkk., 2025):** Penelitian ini menunjukkan bahwa biochar dari batang pisang mampu mengadsorpsi multi-logam (Mn, Cd, Pb, Cu) dengan kapasitas tertinggi pada pH 6. Mekanisme yang terlibat kompleks, meliputi pertukaran ion, presipitasi mineral, kompleksasi gugus fungsi (karboksil, hidroksil, fenolik), serta interaksi kation- $\pi$ . Keunggulan utama adalah selektivitas terhadap Pb(II) dalam sistem multi-logam dan kemampuan regenerasi (masih 40-60% setelah 5 siklus). Ini berarti biochar batang pisang dapat digunakan berulang kali, menurunkan biaya jangka panjang. Namun, penurunan efisiensi setelah 5 siklus menunjukkan bahwa metode regenerasi yang optimal masih perlu diteliti lebih lanjut.
- **Biochar Kulit Pisang (Diksha dkk., 2025):** Penelitian ini berfokus pada aplikasi nyata: remediasi lindi (leachate) dari tempat pembuangan akhir (TPA). Hasilnya sangat impresif, dengan efisiensi adsorpsi mencapai **99,77%** untuk Cr dan **99,27%** untuk Ni. Meskipun kapasitas adsorpsi per gram biochar tampak kecil (dalam orde  $10^{-5} - 10^{-6}$  mg/g), efisiensi removal yang hampir sempurna pada konsentrasi rendah hingga sedang menunjukkan bahwa biochar kulit pisang sangat cocok untuk remediasi lingkungan dengan tingkat pencemaran yang realistis, bukan kondisi laboratorium dengan konsentrasi sangat tinggi. Dari perspektif sosial-ekonomi, ini membuka peluang besar bagi negara berkembang yang sering kekurangan akses ke teknologi remediasi mahal, karena bahan baku (kulit pisang) melimpah dan murah.

**D. Perbandingan Efektivitas Berbagai Strategi**

Tabel 2. Perbandingan Efektifitas Berbagai Strategi

Strategi	Target Logam	Efektivitas	Keunggulan Utama	Keterbatasan
Cahaya putih (LED) pada kultur tunas	Cu	Biomassa 1,5x lipat	Meningkatkan total remediasi tanpa menurunkan akumulasi per gram	Masih skala in vitro

Bubuk kulit pisang (bio-adsorben)	Cr	96–99% reduksi	Sangat sederhana, biaya rendah, memanfaatkan limbah	Sulit untuk aplikasi lahan terbuka
Biochar batang pisang	Pb, Cd, Cu, Mn	40–60% setelah 5 siklus	Dapat diregenerasi, selektif terhadap Pb	Efisiensi menurun setelah pemakaian berulang
Biochar kulit pisang	Ni, Cr	~99%	Efisiensi sangat tinggi pada lindi TPA	Kapasitas per gram kecil, cocok untuk konsentrasi rendah

***Strategi Terintegrasi (Pendekatan Sirkular)***

Berdasarkan sintesis dari seluruh hasil di atas, pembahasan mengarah pada kesimpulan bahwa strategi terbaik bukanlah menggunakan salah satu pendekatan secara terpisah, melainkan menggabungkannya dalam suatu sistem terintegrasi yang berkelanjutan. Berikut adalah skenario yang diusulkan:

- **Fitoremediasi dengan Tanaman Hidup:** Tanaman pisang ditanam di lahan tercemar dengan optimalisasi kondisi lingkungan, terutama pencahayaan (misalnya menggunakan cahaya putih jika di rumah kaca atau memilih lokasi tanam dengan intensitas cahaya matahari penuh). Pada tahap ini, tanaman menyerap logam berat (terutama Pb, Cd, Cu) melalui sistem perakaran dan mengakumulasinya di biomassa (daun, batang, akar). Rekayasa cahaya putih memastikan pertumbuhan biomassa maksimal sehingga total logam yang terserap juga maksimal.
- **Konversi Limbah Pisang Menjadi Biochar:** Setelah tanaman mencapai fase panen atau menunjukkan tanda-tanda toksisitas (misalnya klorosis atau hambatan pertumbuhan), biomassa tanaman tidak dibuang. Seluruh bagian tanaman, termasuk batang semu, daun, dan kulit buah (yang biasanya menjadi limbah), dikumpulkan dan diolah melalui proses pirolisis pada suhu 300-700°C dalam kondisi oksigen terbatas. Proses ini mengubah biomassa menjadi biochar, material berpori kaya karbon dengan gugus fungsi pengikat logam.
- **Aplikasi Biochar untuk Remediasi Lanjutan:** Biochar yang dihasilkan kemudian diaplikasikan kembali ke lahan yang sama (atau lahan tercemar lainnya) sebagai

pembenah tanah dan adsorben. Biochar akan mengikat sisa-sisa logam berat yang tidak terserap oleh tanaman pada tahap pertama, serta mencegah logam tersebut larut ke dalam air tanah. Selain itu, biochar juga memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air dan nutrisi, sehingga lahan yang telah diremediasi menjadi lebih subur untuk penggunaan di masa depan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan review literatur yang dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Tanaman pisang (*Musa spp.*) memiliki kapasitas fitoremediasi yang terbukti terhadap berbagai logam berat. Penelitian oleh Kumar (2014) menunjukkan bahwa *Musa paradisiaca* mampu menyerap timbal (Pb) dan kadmium (Cd) dari tanah terkontaminasi sludge, sementara Kok & Irawati (2020) mendemonstrasikan kemampuan kultur tunas pisang dalam mengakumulasi tembaga (Cu) dari media pertumbuhan.
2. Rekayasa kondisi lingkungan melalui pengaturan spektrum cahaya terbukti efektif meningkatkan kapasitas fitoremediasi tanaman pisang. Kok & Irawati (2020) menemukan bahwa cahaya putih (LED) dapat meningkatkan biomassa kultur tunas pisang hingga 1,5 kali lipat dibandingkan cahaya merah dan biru, tanpa mengurangi konsentrasi tembaga yang terakumulasi dalam biomassa.
3. Pemanfaatan limbah pisang sebagai bio-adsorben merupakan strategi yang sangat efektif dan ekonomis. Kaniyappan, Rathinasamy, dan Manivanan (2022) melaporkan bahwa bubuk kulit pisang mampu mereduksi konsentrasi kromium hingga 98,93% dari air limbah industri. Chen dkk. (2025) menunjukkan bahwa biochar batang pisang efektif mengadsorpsi logam Pb, Cd, Cu, dan Mn melalui mekanisme pertukaran ion, kompleksasi gugus fungsi, dan presipitasi mineral. Diksha dkk. (2025) menambahkan bahwa biochar kulit pisang mampu menghilangkan nikel dan kromium dari lindi TPA dengan efisiensi 98,76% hingga 99,77%.
4. Strategi terintegrasi yang menggabungkan optimalisasi pertumbuhan tanaman pisang hidup (dengan rekayasa cahaya) dan pemanfaatan limbah pisang pasca-panen (sebagai biochar) merupakan pendekatan paling komprehensif dan berkelanjutan untuk meningkatkan fitoremediasi tanah tercemar logam berat.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691.
- Chen, Y., Li, M., & Wang, H. (2025). Banana pseudostem biochar for efficient remediation of heavy metals in water: Multi-metal adsorption mechanisms and reusability. *Applied Organometallic Chemistry*, 39(3), e70012.
- Diksha, Sharma, R., & Kumar, V. (2025). Low-cost banana peel biochar as an effective adsorbent for removal of hazardous metals from landfill leachate. *International Journal of Phytoremediation*, 27(5), 612-625.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdorran, F., & Xie, Y. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The Scientific World Journal*, 2015, 756120.
- Gall, J. E., Boyd, R. S., & Rajakaruna, N. (2015). Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(4), 201.
- Kaniyappan, V., Rathinasamy, R. M., & Manivanan, J. G. (2022). Banana peels as bio-adsorbent for heavy metal remediation: A study on chromium removal from industrial wastewater. *Mass Spectrometry Letters*, 13(4), 166-176.
- Kok, T., & Irawati, F. (2020). Effect of three LED lights on the biomass production and copper remediation by shoot cultures of *Musa paradisiaca*. *Heliyon*, 6(10), e05240.
- Kumar, P. (2014). Studies on Cadmium, Lead, Chromium and Nickel-scavenging capacity by In-Vivo Grown *Musa paradisiaca* L. using Atomic Absorption Spectroscopy. *Journal of Functional and Environmental Botany*, 4(1), 22-25.
- Wang, Y., Zhang, H., & Liu, X. (2024). Agricultural sources of heavy metal contamination in farmland soils: A global meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133456.