

POTENSI MIKOREMEDIASI LOGAM PB DAN CD DENGAN ISOLAT JAMUR INDIGENOUS DARI TPA PIYUNGAN, YOGYAKARTA

Annisa Nur Lathifah^{1*}, Diah Ayu Prawitasari¹, Adelia Anju Asmara¹, Diah Aqila Fadia Haya¹, Khodijah Karimah¹, Dewi Wulandari¹

¹ Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: annisa.lathifah@uii.ac.id

Abstrak

Pencemaran logam berat adalah masalah lingkungan utama karena toksisitasnya, ketahanannya, dan potensi akumulasi di ekosistem. Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) adalah salah satu logam berat beracun yang dapat mencemari tanah dan air tanah, terutama akibat praktik pengelolaan limbah yang tidak tepat. Bioremediasi menggunakan mikroorganisme, termasuk jamur, telah diteliti sebagai pendekatan alternatif untuk mengurangi kontaminasi logam berat. Studi ini bertujuan untuk mengisolasi jamur endemik dari tanah Tempat Pembuangan Akhir Piyungan dan mengevaluasi potensi mereka untuk bioremediasi Cd dan Pb. Sampel tanah dikumpulkan dari Tempat Pembuangan Akhir Piyungan dan dilakukan isolasi jamur menggunakan metode tuang untuk memperoleh isolat jamur asli. Potensi remediasi dari isolat jamur dievaluasi dalam media terbatas nutrisi yang dimodifikasi dengan penambahan konsentrasi Cd sebesar 0,5, 5, dan 10 ppm serta konsentrasi Pb sebesar 50, 100, dan 150 ppm, dengan Bromothymol Blue (BTB) sebagai indikator. Karakterisasi jamur dilakukan berdasarkan pengamatan makroskopis, termasuk warna koloni, karakteristik permukaan, dan morfologi, serta pengamatan mikroskopis menggunakan pewarnaan lactophenol blue. Semua isolat menunjukkan potensi untuk bioremediasi logam berat, yang ditunjukkan oleh pertumbuhan jamur dan perubahan warna serta pH media setelah terpapar Pb dan Cd. Potensi remediasi optimum untuk Cd diamati pada isolat 5, 6, dan 7 pada konsentrasi masing-masing 0,5, 5, dan 10 ppm. Sementara itu, semua isolat menunjukkan potensi untuk remediasi Pb berdasarkan perubahan pada media uji. Temuan ini menunjukkan bahwa jamur lokal yang diisolasi dari tanah tempat pembuangan sampah memiliki potensi sebagai agen biologis untuk remediasi lingkungan yang terkontaminasi Pb dan Cd.

Kata kunci: logam berat, timbal, cadmium, indigenous fungi, bioremediasi, tanah *landfill*

Abstract

Heavy metal pollution is a major environmental problem due to its toxicity, persistence, and potential accumulation in ecosystems. Cadmium (Cd) and Lead (Pb) are among the toxic heavy metals that can contaminate soil and groundwater, particularly due to improper waste management practices. Bioremediation using microorganisms, including fungi, has been investigated as an alternative approach for reducing heavy metal contamination. This study aimed to isolate indigenous fungi from Piyungan Landfill soil and evaluate their potential for Cd and Pb bioremediation. Soil samples were collected from Piyungan Landfill and subjected to fungal isolation using pour plate methods to obtain indigenous fungal isolates. The remediation potential of fungal isolates was evaluated in modified nutrient-limited media supplemented with Cd concentrations of 0.5, 5, and 10 ppm and Pb concentrations of 50, 100, and 150 ppm, with Bromothymol Blue (BTB) as an indicator. Fungal characterization was performed based on macroscopic observations, including colony color, surface characteristics, and morphology, as well as microscopic observation using lactophenol blue staining. All isolates demonstrated potential for heavy metal bioremediation, indicated by fungal growth and changes in medium color and pH after exposure to Pb and Cd. The optimum remediation potential for Cd was observed in isolates 5, 6, and 7 at concentrations of 0.5, 5, and 10 ppm, respectively. Meanwhile, all isolates showed potential for Pb remediation based on changes in the test medium. These findings indicate that indigenous fungi isolated from landfill soil have potential as biological agents for the remediation of Pb- and Cd-contaminated environments.

Keywords: heavy metals, lead, cadmium, indigenous fungi, bioremediation, landfill soil

1. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan unsur dengan massa jenis tinggi dan dapat dibedakan berdasarkan fungsinya. Penggolompokan logam terdiri dari logam esensial yang dibutuhkan dalam jumlah mikro (seperti Fe, Cu, Zn) dan logam non-esensial yang sangat beracun meskipun dalam konsentrasi rendah (seperti Pb dan Cd). Jenis logam beracun dapat bersifat persisten dan sangat toksik terhadap lingkungan. Logam berat yang berbahaya sebagian besar bersumber dari aktivitas antropogenik, salah satunya adalah aktivitas pembuangan sampah ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Komposisi sampah di TPA yang sangat beragam akan mengalami proses pembusukan, kemudian saat hujan akan terjadi rembesan, air lindi, yang melewati tumpukan sampah membawa polutan termaksud logam berat. Pengelolaan TPA yang tidak baik otomatis akan berkontribusi menghasilkan air lindi yang besar. Di Indonesia, permasalahan TPA masih belum dikelola dengan baik khususnya di TPA Piyungan, Yogyakarta.

TPA Piyungan yang menerapkan sistem *sanitary landfill* menghadapi tantangan serius berupa tumpukan sampah yang menghasilkan air lindi (*leachate*) cukup besar. Hasil uji laboratorium pada tanah di sekitar TPA Piyungan menunjukkan konsentrasi Timbal (Pb) telah melebihi ambang batas, dengan nilai mencapai 6,80 ppm, sementara logam Kadmium (Cd) juga terdeteksi dalam berbagai fraksi partikulat (Iresha et al, 2024). Akumulasi logam berat ini memberikan dampak buruk yang signifikan bagi kesehatan manusia. Paparan Pb yang terakumulasi dalam tubuh dapat menyebabkan gangguan sistem saraf, kerusakan enzim esensial, hingga penurunan fungsi otak, sedangkan Cd diketahui menumpuk di ginjal dan memicu disfungsi organ serta penyakit paru obstruktif (Haniya et al., 2022).

Kondisi ini diperlukan teknologi pengelolaan yang efektif untuk mengurangi keberadaan logam berat di lingkungan. Salah satu solusi yang kini banyak dikembangkan adalah bioremediasi. Teknologi ini dianggap lebih unggul dibandingkan metode fisik dan kimia karena bersifat ramah lingkungan, berbiaya rendah, dan mampu mengubah polutan menjadi bentuk yang kurang berbahaya melalui mekanisme biologis. Dalam perkembangannya, pemilihan inokulum atau agen biologi menjadi faktor kunci keberhasilan. Meskipun bakteri sering digunakan, kelompok jamur (mikoremediasi) menawarkan potensi yang sangat tinggi karena memiliki biomassa miselium yang luas, kemampuan biosorpsi yang kuat melalui gugus fungsi pada dinding selnya, serta laju multiplikasi yang cepat. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa isolat jamur seperti *Aspergillus niger* mampu mengakumulasi logam Cd dengan efisiensi mencapai 98% (Khan et al., 2019).

Namun, penelitian terdahulu masih terdapat celah yang dapat diisi. Sebagian besar studi berfokus pada isolat komersial atau isolat dari lokasi yang berbeda. Penelitian yang membahas potensi jamur indigenous yang diisolasi langsung dari lokasi tercemar seperti TPA Piyungan masih sangat terbatas, padahal isolat lokal memiliki adaptasi fisiologis yang lebih baik terhadap toksisitas spesifik di habitat asalnya. Selain itu, analisis mengenai perubahan morfologi jamur saat terpapar logam berat konsentrasi tinggi masih jarang dilakukan, padahal data tersebut krusial untuk memahami mekanisme pertahanan jamur dalam pengembangan teknologi mikoremediasi skala besar. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melihat potensi mikoremediasi logam Pb dan Cd menggunakan isolat jamur indigenous dari TPA Piyungan serta menganalisis respon morfologisnya sebagai dasar teknologi remediasi yang berkelanjutan.

2. METODOLOGI

2.1 PENGAMBILAN SAMPEL ISOLAT JAMUR *INDIGENIOUS*

Sampel diambil secara komposit di tiga titik utama lokasi TPA Piyungan, TPA Piyungan, Dusun Ngablak, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Daerah Istimewa Yogyakarta yang mewakili kondisi TPA Piyungan. Titik koordinat utama pengambilan sampel tanah adalah 7°52'11.3"S 110°25'46.7"E (titik sampling 1); 7°52'12.8"S 110°25'48.4"E (titik sampling 2); 7°52'13.9"S 110°25'50.3"E (titik sampling 3) (Gambar 1). Sebanyak tiga sampel tanah diambil secara acak di setiap tiga titik utama dengan kedalaman 40 cm dan jarak antar pengambilan sampel 1 m. Sampel-sampel selanjutnya dimasukkan kedalam *cooler box* yang dibawa ke laboratorium untuk dilakukan isolasi jamur indigenous.



Gambar 1. Titik lokasi pengambilan sampel tanah dari TPA Piyungan, Yogyakarta

2.2 ISOLASI JAMUR *INDIGENOUS*

Jamur *indigenous* diisolasi menggunakan metode *pour plate* pada media *Dilute Malt Extract Agar* (DMEA) sebagai media dengan kandungan nutrisi rendah. Sampel tanah komposit dipersiapkan dengan mencampurkan 5 g tanah dengan 45 mL akuades steril, kemudian dihomogenisasi secara menyeluruh. Pengenceran berseri dilakukan dengan memindahkan 1 mL suspensi ke dalam 9 mL akuades steril hingga diperoleh tingkat pengenceran berkisar antara 10^{-1} hingga 10^{-8} . Proses isolasi jamur dilakukan dengan menginokulasikan 1 mL dari masing-masing tingkat pengenceran ke dalam cawan petri berisi media DMEA steril menggunakan teknik *pour plate*. Penggunaan media dengan nutrisi rendah bertujuan untuk mendukung pertumbuhan berbagai jenis jamur *indigenous* serta mengurangi dominasi spesies jamur yang memiliki pertumbuhan cepat. Media DMEA dibuat dengan melakukan pengenceran *Malt Extract Agar* (MEA) hingga mencapai konsentrasi 1/100, kemudian disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 20 menit dengan tekanan 1 atm. Isolat jamur dengan karakteristik makroskopis yang berbeda hasil isolasi awal dipilih dan dipindahkan ke media *Malt Extract Agar* (MEA) untuk pembuatan kultur stok. Kultur tersebut kemudian diinkubasi hingga terbentuk pertumbuhan koloni yang dapat diamati secara visual.

2.3. UJI REMEDIASI KADMIUM (CD) DAN TIMBAL (PB) MENGGUNAKAN MEDIA MODIFIKASI RENDAH NUTRISI

Uji remediasi dilakukan menggunakan media modifikasi dengan kandungan nutrisi rendah yang ditambahkan logam kadmium (Cd) atau timbal (Pb) serta *Bromothymol Blue* (BTB). Modifikasi media ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan isolat jamur dalam mentoleransi dan berpotensi memanfaatkan Cd atau Pb pada kondisi keterbatasan nutrisi. Penambahan BTB digunakan sebagai indikator untuk mempermudah pengamatan aktivitas jamur serta kemungkinan terjadinya proses transformasi logam. Media modifikasi dibuat menggunakan *Malt Extract Agar* (MEA) yang telah diencerkan (konsentrasi 1/10), kemudian ditambahkan 2% bacto agar, BTB, serta Cd atau Pb. Larutan BTB 0,5% dibuat menggunakan pelarut KOH 0,2 N, kemudian sebanyak 0,54 mL larutan BTB ditambahkan ke dalam 120 mL media. Penambahan BTB menyebabkan peningkatan pH media, sehingga dilakukan penambahan 2,9 mL HCl untuk menyesuaikan pH media menjadi kondisi asam yang sesuai untuk pertumbuhan jamur (pH 5,5). Konsentrasi Cd dan Pb yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan tingkat kontaminasi Cd dan Pb yang telah dilaporkan pada tanah area landfill serta hasil penelitian sebelumnya (Chalid, 2022). Tiga variasi konsentrasi Cd yang digunakan yaitu 0,5; 5; dan 10 mg/L. Larutan stok Cd (100 mg/L) dibuat dengan melarutkan

$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dalam akuades, kemudian larutan kerja disiapkan menggunakan metode pengenceran. Media yang telah disiapkan mengandung Cd dengan konsentrasi 0,5; 5; dan 10 mg/L dengan nilai pH masing-masing yaitu 5,59; 5,47; dan 5,50. Sedangkan untuk pengujian remediasi Pb digunakan 3 konsentrasi logam Pb yaitu 50 ppm, 100 ppm, dan 150 ppm. Setiap larutan tersebut dibuat sebanyak 120 ml dengan komposisi 0,576 gram MEA; 2,4 gram agar bacteriological; 30 ml larutan Pb 200 ppm (untuk 50 ppm), 60 ml larutan Pb 200 ppm (untuk 100 ppm), dan 90 ml larutan Pb 200 ppm (untuk 150 ppm); 0,3 ml larutan BTB dengan KOH; aquades. Semua bahan tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga homogen dan disesuaikan pH nya hingga mencapai pH 5-6. Media kemudian disterilkan menggunakan autoklaf pada 121°C selama 20 menit dengan tekanan 1 atm.

2.4 IDENTIFIKASI MORFOLOGI JAMUR

Identifikasi jamur dilakukan berdasarkan pengamatan makroskopis dan mikroskopis dengan mengacu pada panduan identifikasi jamur oleh Suryani *et al.* (2020). Identifikasi secara makroskopis dilakukan dengan mengamati karakteristik koloni jamur yang tumbuh pada media, meliputi morfologi koloni, warna, tekstur, pola pertumbuhan, serta ukuran koloni. Identifikasi secara mikroskopis dilakukan menggunakan metoden slide culture dan pewarnaan *Lactophenol Cotton Blue* (LPCB). Pada metode slide culture, isolat jamur diinokulasikan di sekitar potongan kecil agar yang diletakkan pada kaca objek steril, kemudian ditutup menggunakan kaca penutup. Preparat tersebut ditempatkan dalam ruang lembap (*moist chamber*) yang berisi kapas steril dan diinkubasi selama 3–5 hari. Struktur mikroskopis jamur, meliputi hifa, spora, dan struktur reproduktif, diamati menggunakan mikroskop untuk proses identifikasi (Valencia *et al.*, 2017).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

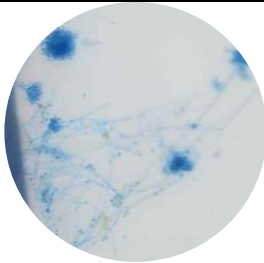
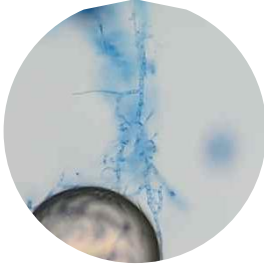
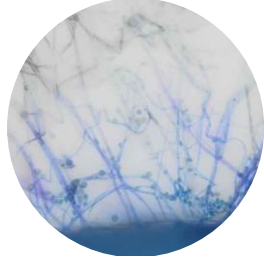
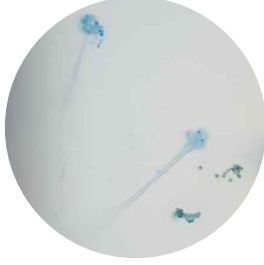
Hasil isolasi jamur dari tanah TPA Piyungan, Yogyakarta menunjukkan keberhasilan memperoleh beberapa isolat jamur *indigenous* dengan karakteristik morfologi yang berbeda. Sebanyak lima isolat dipilih untuk pengujian selanjutnya (Tabel 1.). Lingkungan TPA yang memiliki kandungan bahan organik dan potensi kontaminasi logam berat menjadi kondisi selektif bagi mikroorganisme yang mampu beradaptasi terhadap tekanan lingkungan. Jamur memiliki potensi besar sebagai agen bioremediasi karena memiliki pertumbuhan hifa yang luas, rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, kemampuan menghasilkan enzim ligninolitik ekstraseluler, serta memiliki mekanisme pertahanan terhadap toksisitas logam berat (Dixit *et al.*, 2015; Spina *et al.*, 2018; Ceci *et al.*, 2020). Selain itu, jamur sebagai organisme

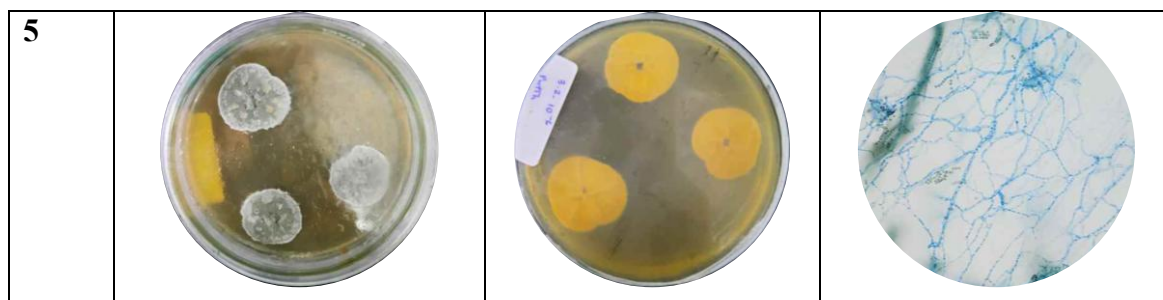
heterotrof memanfaatkan karbon sebagai sumber energi dan komponen penyusun biomassa, sehingga mampu bertahan dan berkembang pada lingkungan dengan kondisi nutrisi yang terbatas (Deacon, 2006; Gadd, 2007; Harms *et al.*, 2011).

3.1. MORFOLOGI INDIGENOUS JAMUR TPA PIYUNGAN

Sebanyak lima isolat jamur yang mempunyai morfologi berbeda dipilih untuk pengujian remediasi logam Pb dan Cd. Isolat-isolat tersebut menunjukkan karakteristik morfologi yang berbeda secara makroskopis dan mikroskopis (Tabel 1.).

Tabel 1. Isolat Jamur *Indigeneous* TPA Piyungan

Kode Isolat	Makroskosis		Mikroskopis
	Tampak Depan	Tampak Belakang	
1			
2			
3			
4			

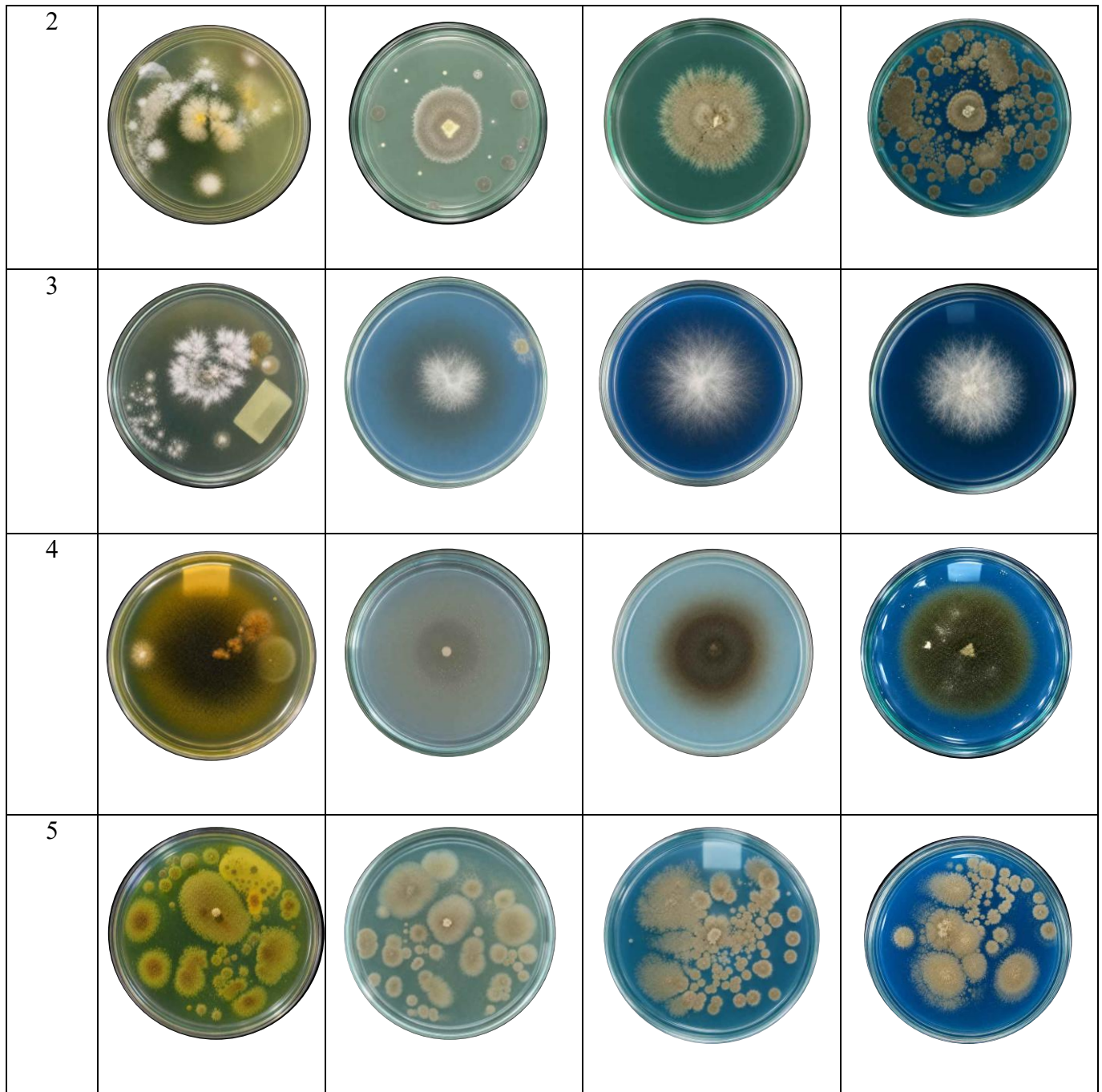


3.2 UJI REMEDIASI ISOLAT JAMUR *INDIGENOUS* PADA LOGAM KADMIUM (CD) DAN TIMBAL (PB)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh isolat mampu tumbuh pada media yang mengandung timbal (Pb) dengan konsentrasi 50, 100, dan 150 ppm. Hal ini menunjukkan adanya toleransi jamur terhadap paparan logam berat. Perubahan warna media dari kuning menjadi hijau kebiruan hingga biru menunjukkan adanya perubahan pH selama proses remediasi yang berkaitan dengan aktivitas metabolik dan enzimatis jamur (Tabel 2.). Efektivitas pertumbuhan berbeda antar isolat, dimana isolat 1 menunjukkan kemampuan terbaik pada konsentrasi Pb 50 ppm dengan diameter koloni mencapai 6,65 cm, isolat 2 paling efektif pada Pb 100 ppm dengan diameter 5,85 cm, sedangkan isolat 3 memiliki pertumbuhan terbaik pada Pb 150 ppm dengan diameter 5,35 cm. Perbedaan kemampuan antar isolat menunjukkan bahwa setiap jamur memiliki tingkat toleransi dan mekanisme adaptasi yang berbeda terhadap tekanan logam berat.

Tabel 2. Perlakuan Jamur *Indigenous* pada Logam Pb setelah 29 hari inkubasi

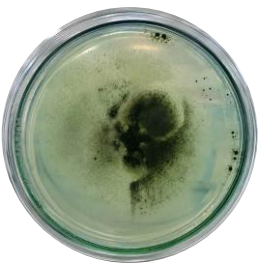
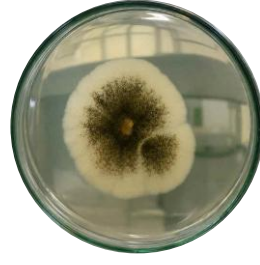
Kode Isolat	Kontrol	50 ppm	100 ppm	150 ppm
1				

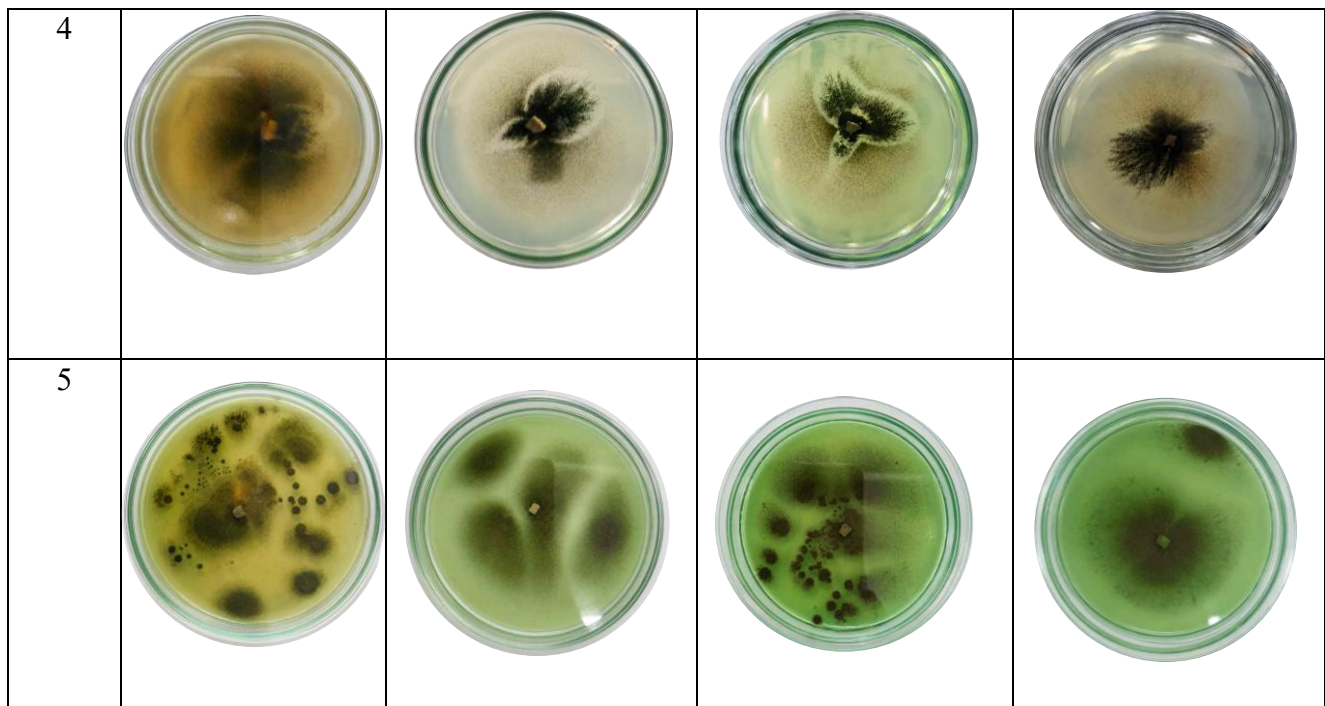


Pada uji remediasi logam kadmium (Cd), seluruh isolat jamur mampu tumbuh pada media minim nutrisi dengan penambahan kadmium (Cd) pada konsentrasi 0,5; 5; dan 10 ppm. Hal ini menunjukkan adanya kemampuan toleransi jamur terhadap paparan logam berat serta potensi sebagai agen bioremediasi. Peningkatan konsentrasi Cd secara umum menyebabkan penurunan laju pertumbuhan dan perubahan karakter morfologi jamur, seperti warna serta pola penyebaran hifa. Beberapa isolat menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan kontrol pada konsentrasi tertentu, yang diduga berkaitan dengan kemampuan adaptasi jamur terhadap

tekanan logam (Tabel 3.). isolate 2, isolate 3, dan isolat 4 menunjukkan pertumbuhan paling baik pada konsentrasi logam Cd sebesar 10 ppm. Mekanisme toleransi logam oleh jamur dapat terjadi melalui beberapa strategi, seperti pengikatan logam pada dinding sel, biosorpsi, kompleksasi intraseluler, serta produksi enzim ekstraseluler maupun intraseluler (Oladipo *et al.*, 2018). Perubahan warna media dari kuning menjadi hijau hingga biru setelah penambahan indikator BTB menunjukkan adanya perubahan pH akibat aktivitas metabolik dan enzimatik jamur selama proses remediasi (Elsababty *et al.*, 2015). Perubahan warna media tersebut terlihat pada hasil penelitian ini setelah 29 hari inkubasi (Tabel 2. dan Tabel 3.).

Tabel 3. Perlakuan Jamur *Indigenus* pada Logam Cd setelah 29 hari inkubasi

Kode Isolat	Kontrol	0,5 ppm	5 ppm	10 ppm
1				
2				
3				



3.3. MEKANISME BIOAKUMULASI LOGAM BERAT OLEH JAMUR

Kemampuan jamur dalam meremediasi Pb terjadi melalui mekanisme biosorpsi, yaitu pengikatan ion Pb^{2+} oleh gugus fungsi pada dinding sel jamur seperti karboksil, hidroksil, fosfat, dan amino melalui proses kompleksasi, pertukaran ion, adsorpsi, serta akumulasi intraseluler (Rajapaksha *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2020; Kapahi dan Sachdeva, 2017; Zhang, 2016). Struktur dinding sel jamur yang tersusun atas polisakarida, protein, dan lipid berperan sebagai tempat pengikatan ion logam melalui interaksi elektrostatik. Kondisi pH juga memengaruhi proses biosorpsi karena perubahan pH dapat memengaruhi muatan permukaan sel dan interaksi antara ion Pb^{2+} dengan biomassa jamur (Ayangbenro *et al.*, 2017). Berdasarkan hasil penelitian, isolat jamur indigenous dari TPA Piyungan memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai kandidat bioremediator logam Pb melalui pendekatan mikoremediasi. Proses remediasi Cd oleh jamur terjadi terutama melalui mekanisme biosorpsi, yaitu pengikatan ion Cd^{2+} pada gugus fungsi di dinding sel jamur melalui interaksi elektrostatik dan pertukaran ion tanpa membutuhkan energi metabolik (Bahafid *et al.*, 2015). Selain itu, aktivitas enzim yang dihasilkan fungi, seperti lignin peroksidase (LiP), mangan peroksidase (MnP), lakkase, serta enzim hidrolitik lainnya, berperan dalam proses transformasi dan detoksifikasi senyawa pencemar (Adenipekun dan Lawal, 2012; Rhodes, 2014; Gupta dan Shrivastava, 2014). Faktor lingkungan seperti pH juga memengaruhi efektivitas adsorpsi Cd, dimana kondisi pH sekitar 5 mendukung proses penyerapan Cd^{2+} oleh biomassa jamur akibat meningkatnya muatan negatif pada permukaan sel (Rakhmawati, 2006; Wahyuningsih *et al.*, 2019). Secara keseluruhan, kelima isolat hasil penelitian ini (Tabel 1.)

memiliki potensi bioremediasi Cd dan Pb dengan tingkat efektivitas yang berbeda berdasarkan kemampuan pertumbuhan, perubahan pH media, dan respon terhadap peningkatan konsentrasi logam.

4. KESIMPULAN

Isolat jamur indigenous yang diperoleh dari tanah TPA Piyungan menunjukkan kemampuan toleransi terhadap paparan logam Pb dan Cd pada berbagai konsentrasi. Seluruh isolat mampu tumbuh pada media yang mengandung Pb hingga 150 ppm dan Cd hingga 10 ppm, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai agen mikoremediasi logam berat. Perbedaan kemampuan antar isolat menunjukkan adanya variasi adaptasi jamur terhadap kondisi lingkungan tercemar.

5. UNGKAPAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) Universitas Islam Indonesia atas dukungan pendanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia atas fasilitas dan dukungan selama penelitian.

REFERENCES

- Adenipekun, C. O., & Lawal, R. (2012). Uses of mushrooms in bioremediation: A review. *Biotechnology and Molecular Biology Reviews*, 7(3), 62–68.
- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1), 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
- Bahafid, W., Joutry, N. T., Asri, M., Sayel, H., Tirry, N., & Ghachtouli, N. E. (2015). Yeast biomass: An alternative for bioremediation of heavy metals. 269–289.
- Ceci, A., Spinelli, V., Massimi, L., Canepari, S., & Persiani, A. M. (2020). Fungi and arsenic: Tolerance and bioaccumulation by soil saprotrophic species. *Applied Sciences*, 10(9), 3218. <https://doi.org/10.3390/app10093218>
- Chalid, L. M. F. (2022). *Analisis kandungan logam berat Cd, Cu, dan Pb menggunakan metode spektrometer serapan atom pada tanah TPA Piyungan, Bantul* [Tugas akhir, Universitas Islam Indonesia].
- Deacon, J. W. (2006). *Fungal biology* (4th ed.). Blackwell Publishing.

- Dixit, R., Wasiullah, Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B. P., Rai, J. P., Sharma, P. K., Lade, H., & Paul, D. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7(2), 2189–2212.
- Elsababty, Z., Ali, A. M., & Houbraiken, J. (2015). Cellulolytic and pectinolytic enzymes of some selected heat resistant fungi. *Journal of Microbiology & Experimentation*, 2(2), Article 00042.
- Gadd, G. M. (2007). Geomycology: Biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. *Mycological Research*, 111(1), 3–49. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001>
- Gupta, E., & Shrivastava, S. (2014). Mycoremediation: A management tool for removal of pollutants from environment. *Environmental Science*, 4, 289–291.
- Haniya, S. A., Ulhaq, N. W., Prastiwi, N., Asmara, A. A., Maziya, F. B., & Abidin, A. U. (2022). Ambient quality of Piyungan landfill and its health risk index. In *Proceedings of the 7th International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE 2022)* (Vol. 4, pp. 510–520). Universitas Islam Indonesia.
- Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011). Untapped potential: Exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9, 177–192. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2519>
- Iresha, F. M., Alisha, R., Melani, N. S., & Gutama, H. (2024). Analysis of the effectiveness of compost-based activated carbon for the removal of heavy metals from leachate at Piyungan Landfill. *Applied Research in Science and Technology*, 4(2), 53–60. <https://doi.org/10.33292/areste.v4i2.65>
- Kapahi, M., & Sachdeva, S. (2017). Mycoremediation potential of *Pleurotus* species for heavy metals: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 4, Article 32. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0162-8>
- Khan, I., Aftab, M., Shakir, S., Ali, M., Qayyum, S., Rehman, M. U., Haleem, K. S., & Touseef, I. (2019). Mycoremediation of heavy metal (Cd and Cr)-polluted soil through indigenous metallotolerant fungal isolates. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9), Article 585. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7769-5>
- Oladipo, O. G., Awotoye, O., Olayinka, A., & Bezuidenhout, C. (2018). Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49, 29–37.

- Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., & Lee, S. S. (2023). Fungi-mediated detoxification of heavy metals: Insights on mechanisms, influencing factors and recent developments. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103800. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103800>
- Rakhmawati, A. (2006). Biosorpsi ion logam kadmium oleh *Aspergillus flavus*. In *Prosiding Seminar Nasional MIPA*.
- Rhodes, C. J. (2014). Mycoremediation (bioremediation with fungi): Growing mushrooms to clean the earth. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 26(3), 196–198.
- Spina, F., Tigini, V., Romagnolo, A., & Varese, G. C. (2018). Bioremediation of landfill leachate with fungi: Autochthonous vs. allochthonous strains. *Life*, 8(3), 27. <https://doi.org/10.3390/life8030027>
- Srivastava, P., et al. (2004, December). Competitive adsorption of cadmium(II) onto kaolinite as affected by pH. In *Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference* (pp. 5–9). University of Sydney.
- Suryani, Y., Taupiqurrahman, O., & Kulsum, Y. (2020). *Mikologi*. PT Freeline Cipta Granesia.
- Valencia, P. E., & Meitiniarti, V. I. (2017). Isolasi dan karakterisasi jamur ligninolitik serta perbandingan kemampuannya dalam biodelignifikasi. *Scripta Biologica*, 4(3), 171–175.
- Xu, X., Hao, R., Xu, H., & Lu, A. (2020). Removal mechanism of Pb(II) by *Penicillium polonicum*: Immobilization, adsorption, and bioaccumulation. *Scientific Reports*, 10, Article 9079. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66025-6>
- Zhang, Y., Li, X., Wang, J., & Zhang, X. (2016). Improvement of tolerance to lead by filamentous fungus *Pleurotus ostreatus* HAU-2 and its oxidative responses. *Chemosphere*, 150, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.003>