

FITOREMEDIASI LOGAM BERAT Pb DAN Zn PADA RESIDU KARBON LIMBAH PADAT MEDIS PASCA PIROLISIS

Gheri Ghifari Mirza¹, Novi Fitria^{2,3}, Nia Rossiana¹

¹Departemen Biologi, Universitas Padjajaran Jl. Raya Bandung Sumedang KM.21, Hegarmanah, Jatinangor, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat 45363, Indonesia

²Program Studi D3 Analis Kesehatan, Sekolah Tinggi Analis Bakti Asih, Jalan Padasuka Atas No. 233, Bandung 40192, Indonesia

³Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih (BRIN), Jalan Sangkuriang, Kec. Coblong, Bandung 40135, Indonesia

E-mail: gherighifari@gmail.com

ABSTRAK

Pengolahan limbah padat medis yang aman dan efisien salah satunya menggunakan metode pirolisis, namun proses ini menghasilkan residu karbon yang mengandung logam Pb dan Zn. Tujuan penelitian ini adalah: 1) mengidentifikasi kadar logam berat Pb dan Zn dalam residu karbon; 2) menganalisis penurunan kadar logam berat Pb dan Zn pada campuran media tanam (residu karbon dan tanah lembang) dengan metode fitoremediasi menggunakan tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* L.) dan bakteri *Pseudomonas aeruginosa*. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan variasi karbon pirolisis 2.5 % b/b dan 5% b/b terhadap berat tanah lembang. Parameter yang dianalisis adalah kadar logam berat Pb dan Zn menggunakan X-ray fluorescence (XRF), selama fitoremediasi (hari ke 0, 15, dan 30). Hasil penelitian menunjukkan kadar Pb dan Zn di residu karbon adalah 83,7 ppm dan 1936,8 ppm. Proses fitoremediasi selama 30 hari menurunkan kadar Pb 100% di konsentrasi 2.5% b/b dan 12.05% di konsentrasi 5% b/b. Sedangkan untuk kadar Zn terjadi penurunan 37,14% di konsentrasi 2.5% b/b dan 10,29% di konsentrasi 5% b/b. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman sengon dan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* mampu menurunkan logam berat Pb dan Zn pada residu karbon limbah padat medis pasca pirolisis.

Kata Kunci: Fitoremediasi, Limbah medis padat, *Pseudomonas aeruginosa*, Sengon

ABSTRACT

*The safe and efficient processing of medical solid waste can be achieved using the pyrolysis method; however, this process results in carbon residue that contains Pb and Zn metals. The objectives of this study are: 1) to identify the concentrations of Pb and Zn in the carbon residue; 2) to analyze the reduction of heavy metal concentrations of Pb and Zn in a planting medium mixture (carbon residue and lembang soil) using phytoremediation with sengon trees (*Paraserianthes falcataria* L.) and the bacterium *Pseudomonas aeruginosa*. The study was conducted on a laboratory scale with pyrolysis carbon variations of 2.5% w/w and 5% w/w relative to the weight of lembang soil. The parameters analyzed include the concentrations of heavy metals Pb and Zn using X-ray fluorescence (XRF) at the beginning, 15 days, and 30 days of phytoremediation. The results showed that the concentrations of Pb and Zn in the carbon residue were 83.7 ppm and 1936.8 ppm, respectively. The phytoremediation process over 30 days reduced Pb concentrations by 100% at the 2.5% w/w concentration and by 12.05% at the 5% w/w concentration. For Zn concentrations, reductions of 37.14% were observed at the 2.5% w/w concentration and 10.29% at the 5% w/w concentration. These findings indicate that sengon trees and the bacterium *Pseudomonas aeruginosa* are capable of reducing Pb and Zn heavy metals in medical solid waste carbon residues after pyrolysis.*

Keywords: Bioremediation, Sengon, *Pseudomonas aeruginosa*, Solid medical waste

1. PENDAHULUAN

Semenjak kasus COVID-19 di Indonesia pada 2020, banyak aspek yang ikut terkena dampaknya. Salah satu aspek yang paling terdampak ialah sektor kesehatan dan farmasi di Indonesia. Rumah sakit serta industri farmasi memiliki beban tambahan selain menyediakan fasilitas pelayanan kesehatan, juga dituntut untuk meningkatkan kemampuan pelayanannya mulai dari pengujian, vaksinasi, hingga perawatan pasien yang memerlukan rawat inap

(Kemenkes RI, 2021). Menurut Asian Development Bank, jumlah limbah medis yang berada di Jakarta bisa mencapai 212 ton/hari dengan jumlah peningkatan limbah medis di Indonesia sebanyak 30-50% (Prasetyawan, 2020; Setyawan & Ayu, 2022). Limbah tersebut didominasi oleh limbah infeksius (limbah Alat Perlindungan Diri), limbah kimia (obat-obatan), limbah farmasi (botol bekas reagen), dan limbah benda tajam (syringe) (Sutrisno & Meilasari, 2020). Limbah tersebut mampu dihancurkan dengan proses insinerasi dengan

suhu minimal 800°C dan dapat ditimbun apabila kandungan logam beratnya berada di bawah baku mutu. (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2018).

Limbah medis umumnya didominasi oleh limbah plastik yang bisa diolah dengan metode pirolisis yang memecah bahan organik dengan proses pemanasan tanpa adanya oksigen (Farhan & Jelita, 2022; T. Norsujianto, 2015). Proses pirolisis ini akan menghasilkan produk akhir berupa minyak pirolisis yang berasal dari kondensasi gas pada pemanasan limbah plastik yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Syamsiro, 2015; T. Norsujianto, 2015). Selain produk akhir berupa minyak, hasil pirolisis juga berupa fase gas (CO, H₂O, H₂, dan CH₄) serta residu karbon (Dhaniswara & Fahriani, 2021; Sukadi & Novarini, 2019). Selain itu, kelebihan metode pirolisis ini mampu untuk mereduksi buangan gas hasil proses pengolahannya hingga 20 kali serta produk yang dihasilkan lebih fleksibel untuk dimanfaatkan (Arini & Lovisia, 2020; Sari, 2017). Pengelolaan limbah medis ini akan menghasilkan residu yang mengandung logam berat, senyawa organik, dan garam anorganik (Kanhar et al., 2020). Beberapa logam berat yang terkandung diantaranya ialah Pb, Cd, Cu, Cr, dan Zn. Logam berat yang terkandung dalam limbah medis padat ini akan menyebabkan gangguan pertumbuhan, perilaku, karakteristik morfologi, serta menyebabkan kematian pada makhluk hidup (Effendi et al., 2012).

Salah satu jenis logam berat yang berbahaya ialah logam timbal (Pb). Timbal mampu masuk ke dalam tubuh manusia melalui penyerapan di kulit, jalur pernafasan, dan jalur pencernaan. Nilai ambang batas logam timbal menurut WHO sebesar 0,1 ppm dan menurut KLHK pada tahun 2021 sebesar 0,5 ppm (Imanudin & Armananto, 2012). Selain itu, kandungan Zn pada karbon residu limbah medis pasca pirolisis berpotensi dalam proses pertumbuhan tanaman pada sintesis hormon auksin sebagai hormon tumbuh, serta membantu dalam proses sintesis protein. Kekurangan unsur Zn pada tanaman, akan menghambat laju pertumbuhan dan produksi tanaman (Yuniarti & Kaya, 2015). Melihat dampak yang ditimbulkan oleh logam, maka diperlukan pengelolaan limbah medis yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Fitoremediasi merupakan metode pemulihan lingkungan tercemar dengan memanfaatkan tumbuhan. Peran tumbuhan pada fitoremediasi ialah eksudat dari tumbuhan tersebut mampu meningkatkan aktivitas bakteri di tanah, sehingga proses akumulasi dan degradasi senyawa yang berikatan dengan logam berat bisa berjalan lebih efektif (Sharma, 2021). Tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* L) merupakan salah satu jenis tanaman yang cepat tumbuh (fast growing trees) dan mampu beradaptasi dengan kondisi tanah yang ekstrem (Widyasari et al., 2010). Jenis tumbuhan ini bisa bersimbiosis dengan bakteri *Rhizobium* maupun bakteri non-simbiosis di rhizosfer, atau Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). Bakteri yang termasuk PGPR ini mampu mengendalikan patogen,

menghasilkan fitohormon, serta memobilisasi unsur hara (Kurniahu et al., 2017).

Spesies bakteri seperti *P. aeruginosa* memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa dan mengakumulasi logam berat. Interaksi antara tumbuhan dengan bakteri ini juga merupakan cara remediasi, menurunkan kadar toksisitas yang efisien serta ramah lingkungan (Spence & Bais, 2015). Selain mengurangi kadar logam berat pada lingkungan, interaksi kedua faktor ini juga mampu meningkatkan pertumbuhan tumbuhan, menginduksi pertumbuhan akar, meningkatkan ketahanan terhadap logam berat, serta meningkatkan kesehatan dari tumbuhan tersebut. Proses bioremediasi ini juga dipengaruhi oleh beberapa faktor kimia serta fisika lain seperti suhu, Ph, asam organik, dll (Fritsche & Hofrichter, 2000).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi tanaman sengon dan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* terhadap penurunan kadar logam Pb dan Zn pada residu karbon hasil pirolisis limbah medis. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi dan pengembangan lanjutan untuk teknologi remediasi limbah medis.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan True Experimental yang dilakukan dalam skala laboratorium. Penelitian ini dilakukan faktor tunggal yaitu konsentrasi karbon pirolisis, dengan terdiri dari tiga taraf yaitu 5%, 2,5%, dan 0% sebagai kontrol, dengan masing-masing pengulangan sebanyak empat sampel. Sampel karbon pirolisis dikomposkan terlebih dahulu dengan bakteri *P. aeruginosa* yang telah diremajakan dan diinokulasikan dengan waktu pertumbuhan yang optimum selama 4 minggu, dengan total berat media tanah setiap sampel sebanyak 2kg. Tanah yang digunakan disterilisasi terlebih dahulu menggunakan oven untuk meminimalisir resiko adanya peran mikroba lain saat proses bioremediasi. Pengamatan kadar logam berat Pb dan Zn yang diamati pada setiap awal dan akhir pengomposan, serta pada hari ke 0, 15, dan 30 penanaman. Data dianalisis secara deskriptif. Pengamatan tambahan dilakukan pada pengukuran tinggi tanaman sengon dan jumlah koloni bakteri *P. aeruginosa*.

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat tulis, alkohol 70%, aquades, autoklaf, bak, beaker glass, botol plastik, cawan petri, cutter, erlenmeyer, gelas ukur, gunting, heating mantle, inkubator, isolat *P. aeruginosa*, kaca objek, kaca penutup, kamera, karbon residu pirolisis, label, Laminar Air Flow, mikroskop, mikropipet, NaCl fisiologis, neraca analitik, nutrient agar, nutrient broth, ose, oven, pembakar bunsen, pinset, plastik, pot, sekop, soil tester, spatula, spiritus, tabung reaksi, tanah, tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria*), timbangan, tip, X-Ray Fluorescence (XRF).

Prosedur Kerja

Kegiatan kerja meliputi proses pirolisis limbah medis yang memerlukan 125 gram sampel setiap sekali running dalam suhu 300°C hingga mendapatkan residu karbon. Kemudian, aklimatisasi tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria L.*) selama 2 bulan beriringan dengan pengomposan tanah dan residu karbon dengan bantuan bakteri *Pseudomonas aeruginosa* yang telah diremajakan sebanyak 20 mL dengan konsentrasi 105 selama 4 minggu. Proses fitoremediasi dilakukan dengan menanamkan tanaman sengon kedalam tanah hasil pengomposan dengan tiga variasi konsentrasi residu karbon pirolisis, yaitu 5%, 2.5%, dan kontrol selama 30 hari. Pengukuran kadar logam berat Pb dan Zn menggunakan X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) Thermo Scientific Niton type XL3t 500 Analyzers. Parameter lain berupa pengukuran jumlah koloni bakteri *Pseudomonas aeruginosa* yang diamati pada hari ke 0, 15, dan 30. Hasil percobaan yang didapatkan dilakukan analisis data dengan metode analisis deskriptif yang bertujuan untuk memperoleh keterangan yang berdasarkan dengan fakta dan proses yang didapatkan dari sampel penelitian yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

Penentuan Berat Sampel Residu Karbon

Penentuan berat residu karbon dalam campuran media tanam ditentukan dalam Pers. (1-2).

$$\text{Berat Residu Karbon (g)} = \text{Konsentrasi (\%)} \times \text{Berat Total Media Tanam (g)} \quad (1)$$

$$\text{Berat Tanah (g)} = \text{Berat Total Media Tanam (g)} - \text{Berat Residu Karbon (g)} \quad (2)$$

Berat total media tanam pada setiap pot sebanyak 2000 gram. Dengan rumus tersebut, maka diperoleh campuran residu karbon sebanyak 100 gram dan tanah lembang sebanyak 1900 gram untuk konsentrasi 5% b/b, serta campuran residu karbon sebanyak 50 gram dan tanah lembang sebanyak 1950 gram untuk konsentrasi 2,5% b/b.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Logam Berat Pb dan Zn pada Tanah Lembang

Tanah yang digunakan sebagai campuran media tanam sengon menggunakan jenis tanah lembang. Menurut penelitian Adistia (2022), jenis tanah lembang merupakan tanah andisol yang biasanya digunakan pada lahan pertanian karena memiliki tingkat kesuburan yang baik. Hasil analisis logam berat Pb dan Zn tanah lembang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kadar Logam Berat Tanah Lembang

Jenis Logam	Konsentrasi (ppm)
Pb	< LOD
Zn	38,21

Tabel 1 menunjukkan kadar logam yang terkandung di dalam tanah lembang. Logam berat timbal (Pb) tidak ditemukan karena konsentrasinya di bawah Limit of Detection alat XRF dan logam berat seng (Zn) ditemukan sebanyak 38,21±3,03 ppm.

Analisis Logam Berat Pb dan Zn pada Residu Limbah Medis

Pengolahan sampel limbah medis dilakukan dengan metode pirolisis dengan menggunakan heating mantle. Proses pirolisis berlangsung selama 10 kali pengulangan dengan menghasilkan residu karbon sebanyak 1232,42 gram. Kadar logam berat yang terkandung di dalam karbon limbah medis dianalisis menggunakan X-ray Fluorescence. Hasil analisis logam berat karbon dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kadar Logam Berat Karbon Limbah Medis Pasca Pirolisis

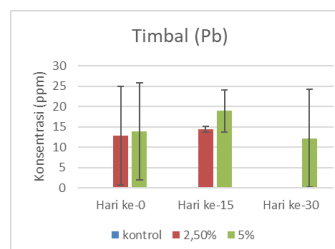
Jenis Logam	Konsentrasi (ppm)
Pb	83,66
Zn	1936,82

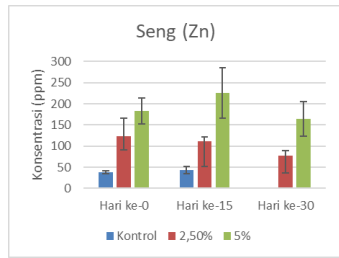
Tabel 2 menunjukkan kadar logam yang terkandung di dalam residu karbon limbah medis pasca pirolisis. Logam timbal (Pb) ditemukan sebanyak 83,66±20,01 ppm dan logam seng (Zn) ditemukan sebanyak 1936,82±103,76 ppm.

Fitoremediasi Residu Karbon Limbah Medis

Proses bioremediasi residu karbon limbah medis menggunakan pot dan tanah sebagai media tanamnya serta diberikan bakteri *P. aeruginosa* dengan konsentrasi 105 sebanyak 20 mL. Variasi konsentrasi karbon terdiri dari 5%, 2.5%, dan kontrol. Pengamatan kadar logam berat dilakukan sebanyak 3 kali yaitu hari ke 0, 15, dan 30 hari penanaman. Sampel tanah diambil pada masing-masing pot di area perakarannya. Hasil penurunan logam berat selama proses fitoremediasi dapat dilihat pada Gambar 2.

(a)





(b)

Gambar 2. Kadar Logam Berat Selama Proses Fitoremediasi (a) Timbal, (b) Seng

Gambar 2. memperlihatkan hasil logam Pb dan Zn yang menurun secara fluktuatif selama proses fitoremediasi. Hasil pengukuran logam Pb pada konsentrasi karbon 5% menunjukkan konsentrasi $13,863 \pm 11,92$ ppm pada hari ke 0, kemudian mengalami peningkatan hingga $18,93 \pm 5,19$ ppm pada hari ke 15, dan menurun hingga $12,19 \pm 12,05$ ppm pada hari ke 30, dengan kadar penurunan logam sebanyak 12,05%. Pada konsentrasi karbon 2,5% menunjukkan konsentrasi $12,83 \pm 12,06$ ppm pada hari ke 0, kemudian mengalami peningkatan hingga $14,43 \pm 0,75$ ppm pada hari ke 15, dan menurun hingga di bawah Limit of Detection pada hari ke 30, dengan kadar penurunan logam sebanyak 100%. Pada tanaman kontrol tidak terdeteksi adanya logam Pb. Hasil pengukuran logam Zn pada konsentrasi karbon 5% terkandung $182,99 \pm 31,39$ ppm pada hari ke 0, kemudian mengalami peningkatan hingga $225,62 \pm 59,84$ ppm pada hari ke 15, dan menurun hingga $164,16 \pm 40,7$ ppm, dengan kadar penurunan logam Zn sebanyak 10,29%. Pada konsentrasi karbon 2,5% terkandung $123,10 \pm 42,97$ ppm pada hari ke 0, kemudian menurun hingga $111,09 \pm 11,28$ ppm pada hari ke 15, dan menurun hingga $77,38 \pm 12,54$ ppm pada hari ke 30, dengan kadar penurunan logam Zn sebesar 37,14%. Pada tanaman kontrol terkandung $38,21 \pm 3,03$ ppm pada hari ke 0, kemudian meningkat hingga $44,02 \pm 8,73$ ppm pada hari ke 15, dan menurun hingga di bawah Limit of Detection, dengan kadar penurunan kadar logam Zn sebesar 100%.

Bakteri *P. aeruginosa* memiliki bagian permukaan bermuatan negatif. Muatan negatif pada bagian permukaan bakteri itu berasal dari berbagai struktur anion. Sedangkan, logam berat bermuatan positif sehingga bisa terjadi reaksi antara permukaan bakteri dengan logam berat yang ada di dalam tanah. Bakteri ini juga bisa mereduksi logam berat (reaksi redoks) sehingga logam yang dihasilkan berupa ion logam berat yang tidak bersifat toksik (Astuti, 2016). Hal ini juga ditegaskan pada penelitian Nur Al-Hayah, et al. (2023), yang menyatakan bahwa bakteri *P. aeruginosa* tidak langsung menghilangkan kadar logam Pb pada proses bioremediasi. Akan tetapi, logam tersebut berubah menjadi senyawa yang tidak beracun yang dipengaruhi oleh karakteristik tanah serta faktor eksternal lingkungannya. Ion Pb yang mampu diserap oleh bakteri ialah ion Pb^{2+} . Bentuk pecahan yang dilakukan oleh *P. aeruginosa* pada ion Pb^{2+} ini seperti PbS (timbal

sulfida), serta $Pb_3(PO_4)_2$ (timbal fosfat). Selain itu, ion Pb^{2+} ini mampu berikatan dengan fraksi liat tanah, yang apabila fraksinya semakin tinggi, maka ikatan Pb^{2+} di dalam tanah juga semakin kuat (Nur Al-Hayah et al., 2023). Hal ini diakibatkan sifat bioavailabilitas logam berat dapat dipengaruhi oleh sifat kimia, fisika, dan fraksi tanah (Setiadi et al., 2017). Baku mutu yang ditetapkan pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, sebesar 0,5 mg/L.

Logam seng merupakan salah satu nutrisi esensial bagi tumbuhan. Dalam konsentrasi yang rendah, seng dapat berperan dalam pembentukan klorofil dan auksin untuk membentuk tunas. Hormon auksin ini dapat merangsang pemanjangan sel pada tunas muda (Novi et al., 2019). Seng bersifat akumulatif ketika konsentrasinya tinggi dalam waktu yang lama akan menghambat proses fotosintesis pada tanaman (Phukan, 2015). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, menyatakan baku mutu karakteristik beracun logam seng sebesar 50 mg/L.

Kenaikan kadar konsentrasi logam terjadi pada hari ke 15 yang dapat dipengaruhi oleh perubahan kelarutan logam berat yang diakibatkan oleh perbedaan nilai pH tanah. Semakin asam atau rendahnya nilai pH, akan membuat tingkat kelarutan dan ketersediaan logam berat semakin tinggi. Kelarutan yang tinggi itu akan membuat logam berat lebih mudah untuk terabsorpsi karena logam berat yang ikut terbawa oleh air menuju ke area perakaran (Suprihatin & Indrasti, 2010).

Selain itu, pada hari ke 15 sudah terjadi proses difusi pasif dan transport aktif yang menyebabkan logam berat yang awalnya tersebar di dalam pot, kemudian bergerak menuju konsentrasi yang lebih rendah yaitu area perakaran tanaman (Zaeni et al., 2021). Hal ini juga didukung dengan penelitian Sari, et al. (2019) yang menguji hasil logam berat paling besar terdapat pada organ akar tanaman hanjuang. Area rhizosfer yang merupakan tempat keberadaan akar tanaman, merupakan area yang memiliki konsentrasi bakteri yang banyak sehingga membuat proses penyerapan logam dan konsentrasi logam di area tersebut lebih tinggi. Sedangkan pada hari ke 0 penanaman, logam masih tersebar merata di seluruh area pot.

Penurunan kadar logam berat dapat terjadi akibat keberadaan tanaman sengon. Perbedaan konsentrasi massa zat logam, akan menciptakan perpindahan secara difusi dan osmosis. Logam yang berkonsentrasi tinggi pada tanah akan berpindah menuju tanaman yang memiliki konsentrasi rendah (Darlis et al., 2023; Yusuf et al., 2014). Proses penyerapan logam pada tanaman disebut sebagai rhizodegradasi. Penguraian logam berat oleh mikroba tanah, dibantu dengan eksudat akar yang berupa asam, alkohol, dan gula. Keberadaan eksudat ini mampu dimanfaatkan oleh mikroba sebagai sumber

nutrisi dalam menguraikan berbagai jenis polutan. Akibat proses ini, dapat menjadikan tanaman sebagai metal excluder (Darlis et al., 2023)

Beberapa jenis logam berat yang bermanfaat bagi tanaman, dalam konsentrasi yang rendah bahkan dapat meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Seperti pada penelitian Manivasagaperumal, et al. (2011) yang menggunakan sampel cluster bean menunjukkan peningkatan pertumbuhan dalam pemberian konsentrasi logam seng (Zn) yang rendah. Keberadaan logam Pb tidak mengganggu pertumbuhan tanaman tinggi sengon. Hal ini dikarenakan akar sengon memiliki kemampuan untuk menjaga ion logam yang bersifat toksik dalam konsentrasi rendah ke dalam sitoplasma. Hal itu dilakukan dengan cara mencegah transport ion logam agar bisa menembus membran plasma tanaman yang dilakukan dengan cara meningkatkan ikatan ion logam pada dinding sel (Reichman, 2002; Saputro et al., 2017).

Perhitungan Jumlah Koloni Bakteri *Pseudomonas aeruginosa*

Hasil perhitungan jumlah koloni bakteri *P. aeruginosa* pada pengenceran 10⁻⁴ tercantum di dalam tabel berikut.

Tabel 3. Jumlah Koloni Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dalam Konsentrasi 10⁻⁴

Konsentrasi	Jumlah Koloni Bakteri (cfu/mL)		
	Hari ke-0	Hari ke-15	Hari ke-30
5%	211.5	161	113.25
2.5%	136.25	153	174.75
Kontrol	74.75	99.5	TNTC

Hasil pengamatan koloni *P. aeruginosa* yang terbentuk dihitung sebanyak 3 waktu penanaman, yaitu hari ke-0, 15, dan 30. Pada Tabel 3, koloni *P. aeruginosa* yang terbentuk di hari ke-0 pada konsentrasi limbah 5% sebanyak 211.5 x 10⁴ cfu/mL, pada konsentrasi limbah 2.5% sebanyak 136.25 x 10⁴ cfu/mL, dan pada kontrol sebanyak 74.75 x 10⁴ cfu/mL. Kemudian, koloni yang terbentuk di hari ke-15 pada konsentrasi limbah 5% sebanyak 161 x 10⁴ cfu/mL, pada konsentrasi limbah 2.5% sebanyak 153 x 10⁴ cfu/mL, dan pada kontrol sebanyak 99.5 x 10⁴ cfu/mL. Lalu, koloni yang terbentuk di hari ke-30 pada konsentrasi limbah 5% sebanyak 113.25 x 10⁴ cfu/mL, pada konsentrasi limbah 2.5% sebanyak 174.75 x 10⁴ cfu/mL, pada kontrol melebihi 300 cfu/mL.

Resistensi dan efektivitas penyerapan logam yang dilakukan oleh bakteri *P. aeruginosa* telah dilakukan pada penelitian Matyar (2023), menyatakan bahwa *P. aeruginosa* memiliki tingkat toleransi logam berat dari yang paling tinggi ke rendah yaitu Cd=Mn>Zn>Pb. Selain itu, *P. aeruginosa* juga memiliki kemampuan

mendegradasi senyawa toksik karena memiliki gen katabolik serta mampu untuk menahan kondisi lingkungan yang ekstrim (Tarfeen, 2022).

Spesies bakteri hidrokarbonoklastik seperti *P. aeruginosa* memiliki gen katabolik yang berperan dalam membaca atau sebagai penyandi enzim pendegradasi hidrokarbon, seperti naftalen dioksigenase (ndo), hidroksilase (alk), dan dioksigenase (tod) (Tebyanian, 2013). Katabolisme hidrokarbon dipengaruhi oleh enzim yang mengkatalisis reaksi oksidasi hidrokarbon oleh enzim aromatik dioksigenase dan alkana hidroksilase (Jauhari, 2014). Masuknya senyawa hidrokarbon ke dalam sel bakteri dapat melalui beberapa proses, seperti peningkatan bioavailabilitas senyawa dengan proses emulsifikasi dan solubilisasi, serta produksi biosurfaktan dengan menurunkan tegangan permukaan sehingga senyawa hidrokarbon mampu membentuk kompleks dengan dinding sel atau sering disebut pseudosolubilisasi (Mishra & Singh, 2012).

Penurunan jumlah koloni bakteri pada perlakuan konsentrasi limbah 5% dapat diakibatkan oleh keberadaan logam Pb yang paling tinggi. Hal yang sama juga dilaporkan pada penelitian Hasibuan et al. (2024) yang menunjukkan adanya penurunan jumlah koloni bakteri *P. aeruginosa* hingga minggu keempat bersamaan dengan penurunan konsentrasi Pb pada saat bioremediasi.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan kadar logam berat Pb dan Zn di residu karbon limbah medis pasca pirolisis sebesar 83,7 ppm dan 1936,8 ppm. Fitoremediasi menggunakan tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* L.) dan bakteri *P. aeruginosa* dapat menurunkan kadar Pb pada konsentrasi 5% b/b dan 2,5% b/b sebesar 12,05% (13,86-12,19 ppm) dan 100% (12,83-< LOD). Penurunan kadar logam Zn pada konsentrasi residu 2,5%. Penurunan kadar Zn konsentrasi 5% b/b dan 2,5% b/b sebesar 10,29% (182,99-164,16 ppm) dan 37,14% (123,10-77,38 ppm). Proses fitoremediasi residu karbon limbah medis pasca pirolisis menggunakan tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* L.) dan bakteri *P. aeruginosa* menunjukkan penurunan kadar logam berat Pb dan Zn selama 30 hari. Semakin tinggi konsentrasi campuran residu karbon dan kadar logam beratnya, maka diperlukan waktu fitoremediasi yang lebih lama.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Adistia, L. D. (2022). Implementasi Metode Nive Bayes untuk Memprediksi N-Tersedia pada Tanah Andisol Lembang. Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Komunikasi STI&K (SeNTIK), 6(1), 83–87.
2. Astuti, A. (2016). Kemampuan Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dalam Menurunkan Kandungan Timbal (Pb) Limbah Cair Laboratorium Kimia UIN Alauddin Makassar. Skripsi. Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar.
3. Darlis, V. V., Putriani, C. N., Yoza, D., & Pebriandi. (2023). Potensi dan Pertumbuhan Beberapa Jenis Tanaman Dalam Penyerapan Logam Berat Timbal (Pb) pada Media Tanah Bekas Tambang Timah Desa Siabu Kecamatan Salo Kabupaten Kampar. *Journal of Tropical Silviculture*, 14(03), 191–194.
4. Hasibuan, I. A. B., Manalu, K., & Nasution, R. A. (2024). Utilization of Bakteria *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus Subtilis* as Bioremediation of Metal Pb in Textile Waste. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(2), 593–599. <https://doi.org/10.29303/jbt.v24i2.6820>
5. Jauhari. (2014). Bacteria Mediated Aerobic Degradation of Hexacosane in vitro Conditions. *Journal of Bioresource Technology*, 170, 62–68.
6. Matyar, F. (2023). Investigation of Cephalosporin and Heavy Metal Resistance of *Aeromonas hydrophila* and *Pseudomonas aeruginosa* Strains Isolated from Hospital Sewage in Türkiye. *Acra Aquatica Turcica*, 19(4), 312–322.
7. Mishra, S., & Singh, S. N. (2012). Microbial Degradation of n-Hexadecane in Mineral Salt Medium as Mediated by Degradative Enzymes. *International Journal of Bioresource Technology*, 111, 148–154.
8. Novi, C., Sartika, & Nur Shobah, A. (2019). Fitoremediasi Logam Seng (Zn) Menggunakan *Hydrilla* sp. Pada Limbah Industri Kertas. *Jurnal Kimia Valensi*, 5(1), 108–114. <https://doi.org/10.15408/jkv.v%vi%i.8814>
9. Nur Al-Hayah, C., Budiyanto, S., & Fuskhah, E. (2023). Fitoremediasi Lahan Tercemar Pb menggunakan *Helianthus annuus* L. dengan *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas aeruginosa*. 2(2).
10. Phukan, P. (2015). Heavy Metal Uptake Capacity of *Hydrilla verticillata*: A Commonly Available Aquatic Plant. *International Research Journal of Environment Sciences*, 4(3), 35–40.
11. Reichman, S. M. (2002). The Responses of Plants to Metal Toxicity: A review focusing on Copper, Manganese and Zinc. Australian Minerals & Energy Environment Foundation.
12. Saputro, T. B., Alfiyah, N., & Fitriani, D. (2017). Pertumbuhan Tanaman Sengon (*Paraserianthes falcataria* L.) Terinfeksi Mikoriza pada Lahan Tercemar Pb. *Open Academic Journals*, 207–217.
13. Setiadi, A. D., Rumhayati, B., & Retnaningdyah, C. (2017). Profil fraksi geokimia logam Cd, Pb, dan Zn pada sedimen wilayah reklamasi lumpur Sidoarjo di muara sungai Porong Sidoarjo. *Jurnal Natural B*, 4(1), 11–22.
14. Suprihatin, & Indrasti, N. S. (2010). Penyisihan Logam Berat dari Limbah Cair Laboratorium dengan Metode Presipitasi dan Adsorpsi. *Jurnal Makara Sains*, 14(1), 44–50.
15. Tarfeen, N. (2022). Microbial Remediation: A Promising Tool for Reclamation of Contaminated Sites with Special Emphasis on Heavy Metal and Pesticide Pollution: A Review. *Processes*, 10(7).
16. Tebyanian. (2013). Hexadecane Degradation by *Teskumurella* and *Stenotrophomonas* Strains Isolated from Hydrocarbon Contaminated Soils. *Journal of Microbiology*, 6(7), 82–91.
17. Yusuf, M., Achmad, Z., & Ardy, A. (2014). Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Pb dan Cd dengan Menggunakan Tanaman Lidah Mertua (*Sansevieria trifasciata*). Skripsi. Program Studi Teknik Lingkungan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar.
18. Zaeni, A., Ambardini, S., Sartinah, A., Ramadhani, A. N., Sartini, Amin, A., Patlung, G. W., & Susilowati, P. E. (2021). Studi Bioakumulasi Logam Crom (Cr), Seng (Zn) dan Nikel (Ni) pada Tanaman Obat Binahong (*Anredera cordifolia* (Ten) Steenis.). *Akta Kimia Indonesia*, 6(1), 12–27. <https://doi.org/10.12962/j25493736.v6i1.7850>