

EFEKTIVITAS PERMEABLE REACTIVE BARRIER (PRB) BERBASIS BIOCHAR TEMPURUNG KELAPA DENGAN PEREKAT SEMEN UNTUK REMEDIASI AIR TERCEMAR LOGAM TIMBAL II (PB²⁺)

EFFECTIVENESS OF COCONUT SHELL BIOCHAR-BASED PERMEABLE REACTIVE BARRIER (PRB) WITH CEMENT FOR REMEDIATION OF LEAD (PB²⁺)-CONTAMINATED WATER

M Ishthilakhul Choiri¹⁾, Ipung Fitri Purwanti^{1*)}, Bieby Voijant Tangahu¹⁾, Harmin Sulistiyaning Titah¹⁾, Mashudi¹⁾, Sarwoko Mangkoedihardjo¹⁾
¹⁾Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Kota Surabaya, 60111

^{*)}E-mail: *ipung_fp@its.ac.id

Abstrak

Pencemaran air tanah oleh logam berat timbal (Pb) berdampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Logam berat Pb merupakan salah satu polutan yang disoroti karena bersifat toksik, persisten, dan bioakumulatif. Berbagai metode telah dikembangkan untuk remediasi air tanah tercemar Pb, tetapi sebagian besar memakan biaya yang mahal dan memerlukan waktu yang lama. Sebagai alternatif, teknologi *Permeable Reactive Barrier* (PRB) menawarkan pendekatan pasif in-situ yang efisien untuk mengurangi kadar logam berat dalam air. Implementasi PRB sudah beberapa kali digunakan dalam mereduksi berbagai kontaminan seperti Cr, Zn, Cu, Pb dan As. Hingga saat ini PRB terus dikembangkan untuk meningkatkan efektivitasnya dalam remediasi air tanah. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas PRB berbahan *biochar* tempurung kelapa dengan perekat semen dalam meremediasi air tanah berkadar Pb 100 mg/L dengan memvariasikan ketebalan (2 cm dan 4 cm). Reaktor beraliran vertikal dioperasikan selama 24 jam untuk mengamati performa penyisihan. Hasil menunjukkan bahwa PRB dengan ketebalan 2 cm menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi, yakni 99,9% dalam waktu detensi 6 jam, melalui mekanisme adsorpsi, presipitasi, dan interaksi ionik. Presipitasi Pb(OH)₂ berperan penting pada pH basa yang dihasilkan oleh hidrasi semen, meskipun kondisi ini memerlukan pengaturan pH efluen sebelum dilepas ke lingkungan. Temuan ini memberikan dasar ilmiah untuk pengembangan PRB berbasis biochar-semen secara lebih luas, termasuk optimasi media, pengujian skala lapangan, dan penerapan pada sistem pengolahan air tercemar lainnya.

Kata kunci: *Biochar, permeable reactive barrier*, remediasi, tempurung kelapa, timbal

Abstract

Groundwater contamination by lead (Pb) has adverse effects on human health and the environment. Lead (Pb) is a highlighted pollutant due to its toxic, persistent, and bioaccumulative nature. Various methods have been developed to remediate Pb-contaminated groundwater; however, most are costly and time-consuming. As an alternative, the *Permeable Reactive Barrier* (PRB) technology offers an efficient passive in-situ approach to reduce heavy metal concentrations in water. The implementation of PRB has been used several times in reducing various contaminants such as Cr, Zn, Cu, Pb and As. Until now, PRB continues to be developed to improve its effectiveness in groundwater remediation. This study aims to evaluate the effectiveness of a PRB made from coconut shell biochar with cement in remediating synthetic wastewater containing 100 mg/L of Pb, by varying the barrier thickness (2 cm and 4 cm). A vertical-flow reactor was operated for 24 hours to observe removal performance. The results showed that the PRB with a thickness of 2 cm and cement binder achieved the highest Pb removal efficiency, reaching 99.9% within 6 hours of detention time, through mechanisms

including adsorption, precipitation, and ionic interactions. The formation of $Pb(OH)_2$ played a key role at the alkaline pH resulting from cement hydration, although this condition requires effluent pH adjustment prior to environmental discharge. These findings provide a scientific basis for further development of cement-biochar-based PRBs, including media optimization, field-scale testing, and broader application in contaminated water treatment systems.

Keywords: Biochar, coconut shell, lead, permeable reactive barrier, remediation

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk di negara berkembang seperti Indonesia mendorong peningkatan aktivitas industri untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Hal ini dilakukan melalui peningkatan kapasitas produksi dan diversifikasi produk (Goswami dan Daultani, 2023; Razak, 2022). Namun, perkembangan industri juga berdampak pada meningkatnya pencemaran lingkungan. Salah satu dampak yang signifikan adalah risiko kontaminasi tanah dan air tanah oleh polutan, terutama logam berat (Long *et al.*, 2021).

Limbah industri mengandung berbagai pencemar berbahaya seperti minyak, logam berat, dan pestisida yang berdampak serius terhadap ekosistem. Logam berat seperti Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Hg, Se, dan As dalam bentuk terlarut sangat berisiko bagi makhluk hidup dan lingkungan. Jika logam berat mencemari air tanah, zat tersebut dapat masuk ke rantai makanan dan terakumulasi dalam tubuh manusia sebagai konsumen puncak sehingga menimbulkan gangguan kesehatan, terutama pada sistem saraf (Oros, 2025). Pencemaran oleh ion logam Pb menjadi perhatian utama karena bersifat toksik, persisten, dan cenderung terakumulasi di lingkungan maupun tubuh manusia.

Remediasi air tanah tercemar timbal (Pb) telah dikembangkan melalui berbagai metode seperti fitoremediasi, bioaugmentasi, oksidasi kimia, dan presipitasi. Fitoremediasi relatif murah, tetapi memakan waktu dan berisiko memasukkan kontaminan ke rantai makanan (Yadav *et al.*, 2024; Madanan *et al.*, 2021). Bioaugmentasi juga hemat biaya, tetapi efektivitasnya tergantung pada kondisi lingkungan yang sulit dikendalikan (Koolivand

et al., 2024). Oksidasi kimia efektif dan cepat, tetapi memakan banyak biaya jika konsentrasi polutannya tinggi (Wu *et al.*, 2024). Sementara itu, presipitasi hanya bisa dilakukan secara *ex-situ* serta memerlukan biaya tinggi untuk pemindahan dan pengelolaan lumpur (Achilleos *et al.*, 2022). Sebagai alternatif, metode *Permeable Reactive Barrier* (PRB) dapat digunakan untuk menurunkan kadar Pb secara lebih efisien.

PRB merupakan teknologi remediasi pasif *in-situ* berupa dinding penghalang reaktif yang mampu mereduksi logam berat saat air melaluinya (Alghifary dan Yeremia, 2021). Material reaktif PRB bervariasi tergantung jenis kontaminan dalam air yang diolah. Xu *et al.* (2022) menyebutkan bahwa *biochar* tempurung kelapa memiliki daya serap Pb yang tinggi, bahkan melebihi karbon aktif. PRB dengan *biochar* ini menjadi alternatif yang lebih unggul dibanding fitoremediasi, bioaugmentasi, oksidasi kimia, dan presipitasi karena lebih efisien dari segi biaya, waktu, serta minim risiko pencemar sekunder dan mudah dioperasikan.

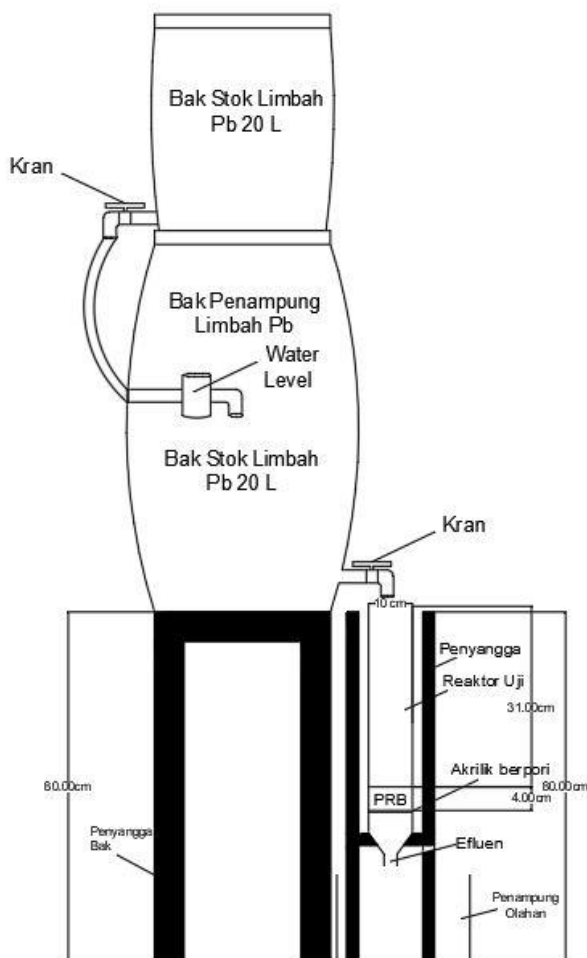
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas PRB *biochar* tempurung kelapa dengan perekat semen dalam meremediasi air yang terkontaminasi logam berat Pb dengan memvariasikan ketebalan PRB. Variasi ketebalan PRB yang diuji adalah 2 cm dan 4 cm. Sistem reaktor dirancang dengan aliran vertikal yang beroperasi selama 24 jam. Air limbah yang digunakan merupakan limbah sintetis dengan konsentrasi Pb sebesar 100 mg/L, yang secara signifikan melebihi ambang batas baku mutu berdasarkan Permen LHK No. 5 Tahun 2022 (0,1—1 mg/L). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya pengetahuan tentang pemanfaatan *biochar* tempurung kelapa sebagai material reaktif dalam PRB serta memberikan solusi inovatif dalam menghadapi tantangan

pencemaran logam berat di air tanah.

2. METODE

2.1 Pembuatan Reaktor

Reaktor dalam penelitian ini menggunakan sistem kontinyu, di mana air limbah dialirkan secara terus menerus melewati PRB yang ditempatkan dalam sebuah reaktor uji dari akrilik ketebalan 3 mm. Desain reaktor tampak seperti pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Desain reaktor PRB

Media PRB dalam reaktor dapat menyebabkan terjadinya *head loss* atau kehilangan tekanan, dihitung dengan rumus Carman-Cozeny (Parvan *et al.*, 2021). Berikut rumus yang diperlukan untuk menghitung *head loss* pada reaktor.

$$N_{Re} = \frac{\Psi \cdot d \cdot v_a}{\mu} \quad (1)$$

Bilangan reynold atau N_{Re} merupakan fungsi diameter dan kecepatan aliran yang digunakan untuk menghitung nilai f' sebagai faktor gesekan pada rumus *head loss*. Setelah mengetahui N_{Re} kemudian menghitung nilai f' dengan rumus berikut.

$$f' = 150 \left(\frac{1-\varepsilon}{N_{Re}} \right) + 1,75 \quad (2)$$

N_{Re} dan f' digunakan untuk menghitung *head loss* dengan rumus berikut.

$$h_L = f' \frac{L}{\Psi} \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \frac{v_a^2}{g} \quad (3)$$

Kemungkinan *overflow* diatasi dengan membuat saluran untuk mengalirkan air limbah sintesis yang berlebih dari reaktor, kemudian ditampung dan dikembalikan lagi ke bak *dosing* awal. Nilai *head loss* pada reaktor terhitung senilai 30,5 cm.

2.2 Pembuatan Air Limbah Sintetis

Air limbah sintetis dibuat dengan melarutkan kristal $Pb(NO_3)_2$ dengan akuades sampai pada konsentrasi 100 mg/L. Air limbah sintetis ditampung dalam jeriken 25 liter untuk ditambahkan ke dalam reaktor selama *running*.

2.3 Persiapan Biochar Tempurung Kelapa

Sebelum digunakan, *biochar* tempurung kelapa diayak dengan ayakan 80 mesh. Lalu, *biochar* diaktivasi dengan basa kuat (NaOH) selama 24 jam agar pori-porinya menjadi lebih luas, memperbesar penyerapan logam Pb (Liu *et al.*, 2021). Karakterisasi *PRB* dilakukan melalui analisis kadar air, kadar abu, kadar volatil, dan kadar *fixed carbon*. Standar yang digunakan ialah mutu arang aktif teknis pada SNI 06-3730-1995. Hasil karakterisasi *biochar* tempurung kelapa ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil karakterisasi *biochar* tempurung kelapa

Karakteristik	Hasil	Baku Mutu	Keterangan
---------------	-------	-----------	------------

Kadar air	0,16%	<15%	Memenuhi
Kadar abu	8,37%	<10%	Memenuhi
Kadar volatil	0,69%	<25%	Memenuhi
Kadar <i>fixed carbon</i>	90,78%	>65%	Memenuhi

2.4 Pembuatan *Permeable Reactive Barrier* (PRB) dengan Variasi Ketebalan

Dalam pembuatan PRB, *biochar* tempurung kelapa berguna sebagai media reaktif dengan semen sebagai media perekatnya. Rasio material perekat dan *biochar* mengacu pada hasil penelitian Aqshadiova (2024). PRB dibuat dengan ketebalan 2 cm dan 4 cm. Variasi ketebalan PRB tampak seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi komposisi media

No.	Ketebalan PRB (cm)	Komposisi Material
1.	2	Semen 30% <i>Biochar</i> 70%
2.	4	Semen 30% <i>Biochar</i> 70%

2.5 Pengoperasian Reaktor

Reaktor dirancang untuk beroperasi secara kontinu selama 24 jam. Bak *dosing* utama akan terus mengalirkan air limbah menuju drum yang dirancang agar volume tetap konstan, yaitu 20 liter. Air limbah sintesis kemudian dialirkan dari drum berukuran 20 liter ke reaktor uji. Pengoperasian reaktor dilakukan di Workshop Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Sampel efluen diambil secara berkala pada jam ke-0, ke-3, ke-6, ke-12, dan ke-24.

2.6 Analisis

Analisis laboratorium yang dilakukan meliputi analisis pH dan kandungan Pb. Hasil uji pH dan kandungan Pb dalam sampel efluen disajikan dalam grafik untuk dianalisis secara deskriptif-kualitatif. Analisis data dilakukan dengan memperhatikan garis tren pada grafik untuk mengevaluasi efektivitas PRB dalam remediasi air limbah tercemar Pb.

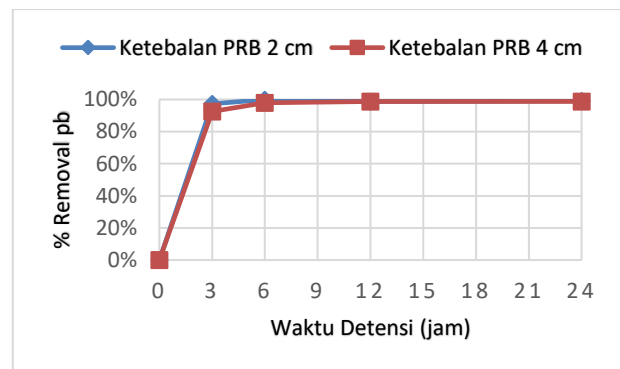
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Efisiensi Penyisihan Logam Berat Pb oleh PRB

Hasil uji kandungan Pb pada sampel efluen masing-masing variasi tampak seperti pada Tabel 3. Grafik efisiensi penyisihan logam berat Pb tersaji dalam Gambar 2.

Tabel 3. Konsentrasi logam berat Pb pada sampel efluen

Variasi Ketebalan	Konsentrasi Pb (mg/L)				
	Waktu Detensi (Jam)				
	0	3	6	12	24
2 cm	100	2,6	0,1	1,2	0,9
4 cm	98,7	7,3	2,1	1,3	1,2



Gambar 2. Grafik efisiensi penyisihan logam berat Pb

Media perekat dalam PRB berperan penting sebagai *binding agent* yang memungkinkan partikel-partikel media reaktif terimobilisasi secara efektif (Navindi *et al.*, 2024). Interaksi antara media perekat dan media reaktif akan membentuk matriks reaktif yang terstruktur dan stabil (Mayacela-Rojas *et al.*, 2021). Kehadiran media perekat tidak hanya menjaga kestabilan fisik dari susunan material di dalam PRB, tetapi juga menentukan kekuatan mekanis dan permeabilitas sistem secara keseluruhan. Ketahanan integritas struktur PRB selama operasi bergantung pada jenis media perekat, sekaligus memastikan bahwa aliran air tetap dapat melewati *barrier* dengan baik tanpa penyumbatan atau kehilangan efisiensi reaktif. Dalam PRB, semen berperan sebagai media perekat yang efektif untuk mempertahankan struktur media reaktif. Penggunaan semen memungkinkan terbentuknya matriks yang padat dan berpori (Xiao *et al.*, 2023). Dengan demikian, aliran air mampu melalui *barrier* tanpa mengorbankan efisiensi penyisihan

kontaminan. Selain itu, karakteristik fisik semen memberikan kekuatan mekanis yang baik pada struktur PRB, menjadikannya tahan terhadap tekanan tanah dan perubahan kondisi lingkungan di sekitarnya (Babalola *et al.*, 2021). Secara kimiawi, semen juga dapat berkontribusi terhadap proses remediasi logam berat melalui peningkatan pH air (Ho *et al.*, 2021).

Peningkatan pH lingkungan di sekitar *barrier* terjadi akibat reaksi hidrasi semen, yang menghasilkan ion hidroksida (OH^-) dan kalsium terlarut (John dan Lothenbach, 2023). Hal ini menciptakan kondisi basa yang mendorong pengendapan logam berat seperti Pb^{2+} , Cd^{2+} , dan Cu^{2+} dalam bentuk hidroksida yang tidak larut (Liu *et al.*, 2023). Selain itu, produk hidrasi semen berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H) memiliki struktur berpori dan muatan permukaan yang memungkinkan terjadinya adsorpsi ion logam berat secara ionik. Senyawa tersebut bersinergi dengan karbon aktif pada *biochar* tempurung kelapa dan meningkatkan kemampuan PRB dalam remediasi logam berat.

Dalam penelitian ini, efisiensi penyisihan logam berat Pb pada variasi ketebalan PRB dengan media perekat semen menunjukkan kinerja sangat tinggi, yakni lebih dari 90%. Efisiensi penyisihan logam berat Pb mencapai 99,9% pada variasi berketebalan 2 cm dengan waktu detensi 6 jam. Setelah melewati waktu tersebut, efisiensi penyisihan logam Pb stabil pada kisaran 98–99% karena terbentuknya kondisi kesetimbangan antara konsentrasi Pb^{2+} terlarut dan kapasitas adsorpsi serta presipitasi media reaktif (Simamora *et al.*, 2024). Kondisi ini memungkinkan sistem PRB mempertahankan performa penyisihan secara konsisten dalam waktu operasional yang lebih panjang.

PRB dengan variasi ketebalan 2 cm dan 4 cm merepresentasikan dosis *biochar* dalam PRB, di mana ketebalan 4 cm memiliki dosis *biochar* yang lebih tinggi. Efisiensi penyisihan logam berat Pb pada PRB—baik dengan ketebalan 2 cm dan 4 cm menunjukkan tren yang relatif

mirip. Perbedaan nilai efisiensi di antara keduanya tidak terlalu jauh. Namun, persen removal paling tinggi dicapai PRB dengan ketebalan 2 cm pada waktu detensi 6 jam, di mana efisiensi penyisihan Pb mencapai nilai maksimum (99%). Adapun PRB ketebalan 4 cm memiliki efisiensi paling tinggi sebesar 98,8% pada waktu detensi 24 jam. Efisiensi penyisihan logam berat Pb pada PRB ketebalan 4 cm menunjukkan adanya peningkatan seiring bertambahnya waktu kontak antara adsorbat dengan adsorben. Hal tersebut dapat disebabkan pada proses adsorpsi, permukaan *biochar* masih sebagian yang terisi, sehingga adsorbat memungkinkan untuk terserap (Amelia *et al.*, 2015).

Hasil ini mengindikasikan bahwa dalam kurun waktu 24 jam, ketebalan 2 cm sudah cukup optimal untuk menyediakan luas permukaan yang diperlukan untuk proses adsorpsi dan presipitasi logam Pb^{2+} oleh media reaktif *biochar* tempurung kelapa dan produk hidrasi dari semen sebagai media perekat. Penentuan ketebalan PRB yang efektif harus mempertimbangkan kesetimbangan antara luas permukaan aktif media, waktu detensi yang cukup, serta efisiensi hidrolis sistem (Bilardi *et al.*, 2023). Hal ini berguna untuk memaksimalkan penyisihan logam berat dalam air tercemar tanpa memperbesar volume sistem secara berlebihan.

3.2 Dampak Penggunaan PRB pada pH Air Limbah

Terjadi peningkatan pH pada efluen air limbah, hal tersebut disebabkan adanya reaksi saat air limbah kontak dengan PRB selama *running*. Hasil pengukuran pH dari sampel efluen tampak pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai pH pada sampel efluen dari masing-masing variasi penelitian

Variasi Ketebalan	Hasil Pengukuran pH Waktu Detensi (Jam)				
	0	3	6	12	24
2 cm	6,34	7,33	7,91	7,73	7,99
4 cm	5,79	8,93	8,96	8,94	8,94

Rentang pH pada sistem PRB *biochar* tempurung kelapa dengan media perekat semen yang tercatat antara 5,79 hingga 8,94 menunjukkan bahwa kondisi lingkungan di dalam *barrier* mengalami perubahan menuju suasana basa akibat reaksi hidrasi semen (John dan Lothenbach, 2023). Reaksi ini menghasilkan ion kalsium (Ca^{2+}) dan hidroksida (OH^-) yang secara langsung meningkatkan pH sistem. Kondisi ini sangat menguntungkan bagi proses remediasi logam berat seperti Pb^{2+} karena ion logam cenderung mengalami presipitasi sebagai senyawa hidroksida yang tidak larut, seperti $\text{Pb}(\text{OH})_2$, pada pH yang lebih tinggi (Cruz-Lopes *et al.*, 2021). Selain itu, suasana basa juga memperkuat interaksi elektrostatik antara permukaan bermuatan negatif dari *biochar* dan spesies logam bermuatan positif sehingga memperbesar kapasitas adsorpsi ion logam oleh media reaktif (Ahmad *et al.*, 2022).

Kondisi basa juga dapat mempercepat pembentukan fasa padat dari logam berat melalui reaksi koagulasi dan nukleasi sehingga efisiensi penyisihan meningkat dalam waktu detensi yang relatif singkat (Zhang *et al.*, 2023). Dengan demikian, akselerasi mekanisme penyisihan logam berat Pb dalam PRB ini tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik *biochar* dan senyawa hasil hidrasi semen seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H), tetapi juga sangat ditentukan oleh kondisi kimia mikro-lingkungan yang terbentuk di dalam *barrier*. Rentang pH yang mendekati atau melebihi netral (basa) juga memberikan keuntungan tambahan dengan menurunkan toksisitas. Pada kondisi semacam ini, lingkungan pada sistem mampu mendukung kapasitas kehidupan mikroba apabila dikombinasikan dengan proses bioremediasi.

Kondisi pH yang tidak cukup basa juga dapat mengurangi kemampuan adsorpsi ionik dari permukaan *biochar* karena banyak gugus fungsional seperti karboksil dan fenolat yang belum terionisasi pada pH rendah (Biela *et al.*, 2022). PRB dengan material reaktif *biochar* tempurung kelapa memberikan kontribusi dalam meningkatkan pH dalam air limbah. Hal

tersebut dikarenakan *Biochar* mempunyai pH basa (Hamzah & Priyadarshini, 2019). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa PRB dengan perekat semen memiliki kecenderungan peningkatan pH seiring bertambahnya waktu detensi (Aqshadiova, 2024). Hal tersebut disebabkan karena pH perekat semen yang basa. Adsorpsi logam paling tinggi terjadi pada rentang pH 5-8, sedangkan adsorpsi paling rendah terjadi pada suasana asam dengan $\text{pH} \pm 3$ (Rojas *et al.*, 2021). Efisiensi penurunan logam berat Pb baik ketebalan 2 cm dan 4 cm terjadi sangat signifikan, yaitu lebih dari 90%. Hal tersebut selaras dengan teori bahwa kondisi pH larutan sangat mempengaruhi proses adsorpsi.

Meninjau pH efluen dari sistem PRB yang menggunakan media perekat semen, nilai pH air limbah yang sudah diolah dapat meningkat secara signifikan. Terdapat kemungkinan untuk naik hingga berada di atas pH 9 akibat reaksi hidrasi semen yang menghasilkan ion hidroksida dalam jumlah besar. Kondisi ini menghasilkan efluen yang terlalu basa untuk langsung dilepaskan ke badan air tanpa pengolahan lanjutan karena pH tinggi dapat menimbulkan dampak ekologis negatif, seperti gangguan pada keseimbangan biota perairan dan peningkatan kelarutan senyawa beracun lainnya (Ardianita *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengaturan pH menjadi tahap krusial dalam desain sistem PRB berbasis semen, baik melalui integrasi media penetral (seperti zeolit, pasir silika, atau bahan organik asam) di bagian hilir PRB, maupun dengan menerapkan unit pengolah tambahan untuk menyesuaikan pH efluen sebelum dibuang ke lingkungan. Pendekatan ini memastikan bahwa keberhasilan teknis PRB dalam penyisihan logam Pb yang terkandung dalam air tanah tidak diikuti dengan timbulnya dampak sekunder terhadap ekosistem penerima.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tempurung kelapa sebagai media reaktif dalam PRB efektif untuk meremediasi air yang terkontaminasi logam berat Pb dengan media perekat semen. Efisiensi penyisihan Pb tertinggi diperoleh pada PRB dengan ketebalan 2 cm, yaitu mencapai 99,9% pada waktu detensi 6 jam

dari total waktu uji 24 jam. Namun efisiensi penyisihan Pb oleh PRB ketebalan 4 cm masih memungkinkan untuk terus terjadi di atas 24 jam, hal tersebut dikarenakan dosis *biochar* lebih banyak dibandingkan dengan PRB ketebalan 2 cm. Peningkatan efisiensi penyisihan terjadi hingga PRB mencapai kondisi jenuh, ditandai dengan presipitasi $Pb(OH)_2$. PRB menyisihkan logam berat Pb melalui beberapa mekanisme, antara lain adsorpsi, presipitasi, dan interaksi ion. Penyisihan logam berat dengan PRB bekerja dengan baik pada pH basa, tetapi diperlukan penyesuaian sistem untuk mencegah efluen yang terlalu basa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang telah mendukung penelitian ini melalui dana penelitian Skema Penelitian Fundamental Reguler dengan nomor Kontrak Induk 017/C3/DT.05.00/PL/2025 dan Nomor Kontrak Turunan 1272/PKS/ITS/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Achilleos, P., Roberts, K. R., & Williams, I. D. (2022). Struvite precipitation within wastewater treatment: A problem or a circular economy opportunity?. *Heliyon*, 8(7).
- Ahmad, K., Khan, M. S., Iqbal, A., Potrich, E., Amaral, L. S., Rasheed, S., ... & Ashfaq, M. (2022). Lead In drinking water: Adsorption method and role of zeolitic imidazolate frameworks for its remediation: A review. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133010.
- Alghifary, A. & Yeremia, I. S. (2021). Permeable Reactive Barrier sebagai Inovasi Remediasi Air Asam Tambang yang Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan di Indonesia. *Jurnal Himasapta*, 6(3), 159-170.
- Amelia, M. P., Safaruddin, S., & Muzakki, M. M. (2022). Analisis Prosedur Pembuatan Semen pada PT. Semen Vaturaja. *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(04), 512-522.
- Aqshadiova, H. (2024). Uji Kemampuan Permeable Reactive Barrier (PRB) dengan Perekat Semen dan Geopolimer dalam Upaya Remediasi Air Tercemar Logam Berat Timbal (Pb), Tugas Akhir, S.T., ITS, Surabaya.
- Ardianita, N., Andriani, R., & Maya, N. P. (2023). Efektivitas Ekoenzim Terhadap Kelulushidupan Ikan Lele (*Clarias Sp.*) Pada Media Yang Tercemar Limbah Batik. *Biology Natural Resources Journal*, 1(2), 74-77.
- Babalola, O. E., Awoyera, P. O., Le, D. H., & Romero, L. B. (2021). A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behaviour of concrete composite. *Construction and Building Materials*, 296, 123448.
- Biela, M., Kleinová, A., & Klein, E. (2022). Phenolic acids and their carboxylate anions: Thermodynamics of primary antioxidant action. *Phytochemistry*, 200, 113254.
- Bilardi, S., Calabrò, P. S., & Moraci, N. (2023). A review of the hydraulic performance of permeable reactive barriers based on granular zero valent iron. *Water*, 15(1), 200.
- Cruz-Lopes, L. P., Macena, M., Esteves, B., & Guiné, R. P. (2021). Ideal pH for the adsorption of metal ions Cr^{6+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} in aqueous solution with different adsorbent materials. *Open Agriculture*, 6(1), 115-123.
- Goswami, M., & Daultani, Y. (2023). Product quality optimization vs production capacity optimization: an analytical perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(3), 801-819.
- Hamzah, A. Priyadarshini, R. (2019). Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat. UNITRI Press.
- Ho, G. D., Tabelin, C. B., Tangviroon, P., Tamamura, S., & Igarashi, T. (2021). Effects of cement addition on arsenic leaching from soils excavated from projects employing shield-tunneling method. *Geoderma*, 385, 114896.

- John, E., & Lothenbach, B. (2023). Cement hydration mechanisms through time—a review. *Journal of Materials Science*, 58(24), 9805-9833.
- Koolivand, A., Coulon, F., Ball, A. S., Ismail, N. I., Khudur, L. S., ParsiMehr, M., ... & Godini, K. (2024). Challenges with bioaugmentation and field-scale application of bioremediation processes for petroleum-contaminated sites: A review. *Indian Journal of Microbiology*, 1-17.
- Liu, H., Xu, G., & Li, G. (2021). Preparation of porous biochar based on pharmaceutical sludge activated by NaOH and its application in the adsorption of tetracycline. *Journal of Colloid and Interface Science*, 587, 271-278.
- Liu, J., Wu, D., Tan, X., Yu, P., & Xu, L. (2023). Review of the interactions between conventional cementitious materials and heavy metal ions in stabilization/solidification processing. *Materials*, 16(9), 3444.
- Long, Z., Huang, Y., Zhang, W., Shi, Z., Yu, D., Chen, Y., ... & Wang, R. (2021). Effect of different industrial activities on soil heavy metal pollution, ecological risk, and health risk. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-12.
- Madanan, M. T., Varghese, G. K., & Shah, I. K. (2021). Heavy metal phytoremediation potential of the roadside forage *Chloris barbata* Sw.(swollen windmill grass) and the risk assessment of the forage-cattle-human food system. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 45096-45108.
- Mayacela-Rojas, C. M., Molinari, A., Cortina, J. L., Gibert, O., Ayora, C., Tavoraro, A., ... & Fallico, C. (2021). Removal of transition metals from contaminated aquifers by PRB technology: Performance comparison among reactive materials. *International journal of environmental research and public health*, 18(11), 6075.
- Navindi, R. N. I., Dayanthi, W. K. C. N., & Rajapaksha, S. D. (2024). Utilizing Waste Materials in Permeable Reactive Barriers (PRBs) for Groundwater Remediation in Landfill Areas. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(2), 83.
- Oros, A. (2025). Bioaccumulation and trophic transfer of heavy metals in marine fish: Ecological and ecosystem-level impacts. *Journal of Xenobiotics*, 15(2), 59.
- Parvan, A., Jafari, S., Rahnama, M., Norouzi-Apourvari, S., & Raoof, A. (2021). Insight into particle detachment in clogging of porous media; a pore scale study using lattice Boltzmann method. *Advances in Water Resources*, 151, 103888.
- Razak, I. (2022). Product diversification: Marketing management strategy for business growth. *Jurnal Ekonomi*, 11(03), 2162-2167.
- Rojas, C. M. M., Velásquez, M. F. R., Tavoraro, A., Molinari, A., & Fallico, C. (2017). Use of Vegetable Fibers for PRB to Remove Heavy Metals from Contaminated Aquifers—Comparisons Among Cabuya Fibers, Broom Fibers and ZVI. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 4–10.
- Simamora, E., Nurcholis, M., Ardian, A., Ernawati, R., & Winarno, E. (2024). Studi Literatur: Potensi Fikoremediasi Berbasis Strain Alga Sebagai Biosorben Kontaminan Logam Berat Pada Air Asam Tambang. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 5(3), 627-638.
- Wu, L., Garg, S., & Waite, T. D. (2024). Progress and challenges in the use of electrochemical oxidation and reduction processes for heavy metals removal and recovery from wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, 135581.
- Xiao, J., Lv, Z., Duan, Z., & Zhang, C. (2023). Pore structure characteristics, modulation and its effect on concrete properties: a review. *Construction and Building Materials*, 397, 132430.
- Xu, Y., Youpei, Q., Yujia, Y., Bin, Q., Rui, S., Haoran, Y., Yong, S. (2022). Study on Efficient Adsorption Mechanism of Pb²⁺ by Magnetic Coconout Biochar”. *Molecular Sciences*, 23.
- Yadav, N., Dabas, V., & Sharma, J. G. (2024). Microbial and Phytoremediation of Heavy Metals from Aquatic Ecosystem: An

Initiative for Sustainable Environment.
Journal of Pure & Applied Microbiology,
18(2).

Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., ... & Li, S. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. Journal of King Saud University-Science, 34(1), 101653.

Zhang, X., Zeng, L., Wang, Y., Tian, J., Wang, J., Sun, W., ... & Yang, Y. (2023). Selective separation of metals from wastewater using sulfide precipitation: A critical review in agents, operational factors and particle aggregation. Journal of Environmental Management, 344, 118462.