Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.503

RESEARCH ARTICLE / REVIEW ARTICLE

OPEN ACCESS

Check for updates

APLIKATIF *PHYTOMINING* DENGAN PENDEKATAN TUMBUHAN-MIKROBA UNTUK REMEDIASI LIMBAH REDMUD

Faiza Salsabilla[1)], Bieby Voijant Tangahu[1,2*)], Muhammad Althaf Ryan Akmal[1)], Farras Arafi[1)], Isni Arliyani[1,2)]

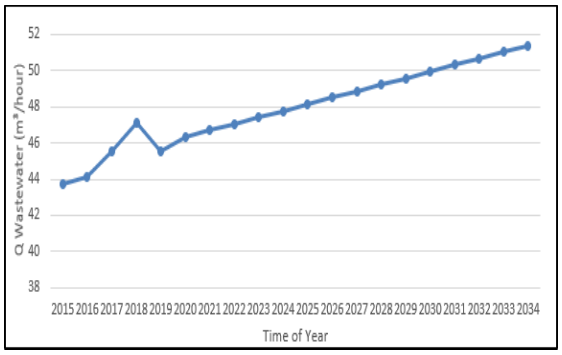
[1)] Department of Environmental Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia. [2)] Research Center for Infrastructure and Sustainable Environment, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

Article history
Received
26 July 2025
Received in revised form
27 July 2025
Accepted
27 July 2025
Published online
29 July 2025

*Corresponding author
voijant@its.ac.id

Graphical abstract





ABSTRACT
Red mud merupakan limbah padat alkalis hasil samping industri pemurnian bauksit. Limbah ini mengandung logam berat seperti kromium (Cr), vanadium (V), dan skandium (Sc) yang bersifat toksik namun juga bernilai ekonomis. Penelitian ini mengkaji pendekatan *phytomining* berbasis tumbuhan-mikroba untuk meremediasi logam berat dari *red mud* secara berkelanjutan. Dua jenis tanaman hiperakumulator, *Tradescantia pallida* dan *Philodendron hederaceum*, dikombinasikan dengan bakteri *Bacillus stercoris* dan *Chromobacterium piscinae* dalam media *red mud* dan pupuk kandang, untuk menguji efektivitas serapan dan translokasi logam. Penelitian dilakukan selama 28 hari dengan pengukuran parameter biomassa, *potential hydrogen* (pH), *electrical conductivity* (EC), serta analisis logam total dan bioavailable menggunakan *inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy* (ICP-OES). Hasil menunjukkan bahwa inokulasi mikroba meningkatkan kepadatan koloni (TPC), pertumbuhan tanaman, serta menurunkan pH dan EC media. *T. pallida* menunjukkan nilai *Translocation Factor* (TF) >1 untuk Cr dan V, sedangkan *P. hederaceum* menunjukkan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) tinggi untuk Cr (hingga 8,50), mengindikasikan potensi sebagai fitostabilisator. Potensi remediasi untuk Sc masih terbatas karena nilai TF dan BCF <1 pada kedua tanaman. Pendekatan ini menawarkan strategi efektif dan aplikatif dalam pengelolaan *red mud* berbasis teknologi hijau.

Keywords: *Bacillus stercoris, Bioaugmentation, Chromobacterium piscinae, Phytoremediation, Red mud.*

Copyright ©2026 Institut Teknologi Sepuluh Nopember, All rights reserved

Corresponding Author: Bieby Voijant Tangahu
voijant@its.ac.id
Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Planning and Geo Engineering Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

1. INTRODUCTION

Lumpur merah atau *red mud* merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses pemurnian bijih bauksit, terutama melalui proses Bayer, di mana soda api (NaOH) digunakan untuk melarutkan aluminium silikat. Limbah ini bersifat sangat alkali dengan pH berkisar antara 10–13, yang disebabkan oleh penggunaan NaOH dalam proses pemasakan (*digestion*) bijih bauksit (Hakim dkk., 2024; Liu, Y., & Naidu, R., 2014). Secara global, produksi *red mud* mencapai sekitar 175,5 juta ton per tahun, dengan total akumulasi lebih dari 4 miliar ton yang telah ditimbun (Liu *et al*., 2021). Selain masalah jumlah yang besar, lumpur merah juga dianggap berbahaya karena kandungan logam berat yang beracun serta dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Tingkat alkalinitas yang tinggi dan sifat toksiknya menjadikan pembuangan lumpur merah sebagai tantangan besar yang memerlukan solusi pengelolaan yang efektif (Oprčkal *et al*., 2020). Secara umum, komposisi mineral *red mud* terdiri dari Fe2O3 30-60%, Al2O3 10-20%, SiO2 3-50%, Na2O 2-10%, CaO 2-8% dan TiO2 dalam jumlah tidak lebih dari 25% (Zaharah *et al*., 2021). Selain itu, dapat mengandung unsur tanah jarang hingga 1700 mg/kg. Hingga saat ini masih belum terdapat realisasi pengolahan limbah *red mud* secara signifikan (Zinoveev dkk, 2021).

Keberadaan logam berat dalam *red mud* menjadi perhatian utama karena selain bernilai ekonomi tinggi, beberapa di antaranya, seperti kromium dalam bentuk heksavalen bersifat toksik terhadap makhluk hidup. Logam berat jenis ini tidak hanya bersifat karsinogenik, tetapi juga dapat menyebabkan gangguan organ vital seperti paru-paru dan ginjal apabila terakumulasi dalam tubuh manusia melalui rantai makanan. Oleh karena itu, diperlukan upaya penanganan yang tepat terhadap *red mud* sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu pendekatan yang potensial adalah teknologi fitoremediasi, yaitu pemanfaatan tanaman untuk menyerap dan menstabilkan kontaminan logam berat dari media terkontaminasi. Fitoremediasi memiliki keunggulan utama, antara lain menghemat energi, biaya operasional rendah (Odoh *et al*., 2019) dan ramah lingkungan (Yulikasari *et al*., 2024).

Pengembangan dari teknologi fitoremediasi adalah *phytomining*, yang secara prinsip bekerja serupa dengan *phytoextraction*, yakni proses pemindahan unsur-unsur anorganik beracun dari tanah menggunakan tanaman tertentu. Tanaman yang digunakan umumnya tergolong sebagai hiperakumulator, yaitu spesies yang mampu menyerap dan menyimpan logam berat maupun metaloid dalam jumlah tinggi di jaringan tubuhnya tanpa mengalami gangguan fisiologis (Purwadi *et al*., 2024). Proses akumulasi logam ini diawali dari penyerapan ion logam oleh sistem perakaran, yang kemudian ditranslokasikan ke jaringan bagian atas tanaman seperti batang, daun, hingga bunga (Siyar *et al*., 2022; Kikis *et al*., 2024). Selain fitoremediasi, pendekatan lain yang dapat diterapkan adalah bioaugmentasi, yakni metode remediasi yang dilakukan dengan menambahkan mikroorganisme, baik yang berasal dari lingkungan setempat (*indigen*) maupun dari luar (*eksogen*), ke dalam media yang terkontaminasi. Tujuan dari penambahan mikroba ini adalah untuk menurunkan tingkat toksisitas logam berat yang ada di lingkungan (Kurniawan *et al*., 2022).

Dalam penelitian ini, pendekatan fitoremediasi dikombinasikan dengan teknik bioaugmentasi menggunakan tanaman *T. pallida* dan *P. hederaceum,* serta bakteri *B. stercoris* dan *C. piscinae*. Kombinasi ini diharapkan mampu meningkatkan efektivitas tanaman dalam menyerap unsur kromium, vanadium, dan skandium, sehingga menghasilkan kemampuan uptake logam berat yang lebih tinggi secara berkelanjutan.

This journal is © Marsono, et al. 2026

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Pengumpulan dan Pengambilan Sampel

Sampel *red mud* yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Kecamatan Tayan, Desa Piasak Tayan Hilir, Balai Belungai, Kabupaten Sanggau, Provinsi Kalimantan Barat, Indonesia (0°04'04.6"S 110°08'31.9"E). *Red mud* diperoleh dari PT Indonesia Chemical Alumina (PT ICA) pada tahun 2024. Sedangkan, untuk pupuk kandang yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari toko bunga di Bratang Surabaya.

Sampel *red mud* segar diambil dalam jumlah yang memadai untuk keperluan isolasi bakteri *indigenous* yang berasal dari *red mud* tersebut. Proses isolasi dilakukan secara murni menggunakan teknik kultur pada media agar, seperti Nutrient Agar (NA), untuk memperoleh koloni tunggal yang representatif. Tahapan isolasi meliputi pemisahan, pemurnian, dan analisis morfologi koloni serta morfologi sel menggunakan mikroskop, diikuti oleh pengujian biokimia untuk menentukan karakteristik fisiologis dan enzimatik bakteri. Selanjutnya, identifikasi bakteri dilakukan secara akurat dengan analisis molekuler berupa PCR dan sekuensing DNA gen 16S rRNA, yang hasilnya dibandingkan dengan database DNA (Jufri, R.F., 2020).

Media tanam terdiri dari *red mud* yang dikeringkan di bawah sinar matahari langsung selama ±12 jam untuk mengurangi kelembaban dan mempermudah proses pencampuran. *Red mud* yang telah kering kemudian dihancurkan dan diayak dengan saringan ukuran 10 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Pupuk kandang juga dikeringkan dan diayak dengan prosedur serupa. Setelah itu, media *red mud* dicampur dengan pupuk kandang dengan perbandingan 90% *red mud* dan 10% pupuk kandang (Fitranto *et al*., 2025).

2.2 TPC dan OD

TPC adalah metode analisis yang digunakan untuk mengukur jumlah mikroorganisme dengan memanfaatkan media padat, dengan hasil akhir dalam bentuk jumlah koloni (Safitri dkk., 2023).

Optical density (OD) adalah ukuran kepadatan populasi mikroorganisme dalam sampel, yang dihitung berdasarkan kekeruhan atau penyerapan cahaya yang diukur menggunakan spektrofotometer, yang mencerminkan jumlah mikroorganisme yang ada dalam larutan. Nilai OD berbanding terbalik, semakin tinggi nilai OD, maka semakin banyak cahaya yang diserap oleh bakteri yang menunjukkan konsentrasi bakteri yang lebih tinggi dalam larutan. Sedangkan semakin rendah nilai OD menandakan bahwa semakin rendah pula pertumbuhan dari isolat bakteri tersebut (Fahruddin dkk., 2019).

2.3 Uji *Phytomining* dan Ekstraksi Logam

Penelitian dilakukan selama 28 hari dengan pengambilan sampel pada hari ke-0, hari ke-7, hari ke-14, hari ke-21, dan hari ke-28. Tanaman *T. pallida* dan *P. hederaceum* ditanam dalam reaktor dengan diameter atas 16 cm dan tinggi 14 cm yang berisi media campuran *red mud* dan pupuk kandang sebanyak 1300 gram. Parameter pendukung yang diamati meliputi berat basah, berat kering, pH dan konduktivitas listrik (EC).

Selama masa tanam, jaringan tanaman dipanen sebanyak lima kali dalam 28 hari dan

dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C hingga berat konstan. Sampel tanaman kemudian diekstrak menggunakan larutan *aqua regia* ($HCl:HNO_3$ = 3:1) untuk mengetahui total kandungan

logam kromium (Cr), vanadium (V), dan skandium (Sc). Sementara itu, untuk mengetahui logam yang bioavailable pada media tanam digunakan larutan EDTA 0,01 M. Kemudian dilakukan analisis kadar logam menggunakan instrumen ICP-OES.

2.4 Perhitungan Faktor Bioakumulasi dan Translokasi

Nilai *Translocation Factor* (TF) dan *Bioconcentration Factor* (BCF) dihitung untuk menilai efektivitas tanaman dalam menyerap dan mentranslokasikan logam berat dari akar ke bagian atas tanaman. Formula yang digunakan mengacu pada Tripat *et al*., (2021), sebagai berikut:

$$TF = \frac{Konsentrasi\ logam\ di\ bagian\ atas\ tanaman}{Konsentrasi\ logam\ di\ akar} \quad (1)$$

$$BCF = \frac{Konsentrasi\ logam\ dalam\ tanaman}{Konsentrasi\ logam\ dalam\ media} \quad (2)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Laju Pertumbuhan Bakteri

Uji TPC dilakukan untuk menghitung jumlah mikroba yang terdapat di sampel tanah pada reaktor awal perlakuan dan akhir perlakuan (Irfan & Jufri, 2021). Pada penelitian ini, terdapat dua jenis bakteri yang di uji, yaitu *B. stercoris* dan *C. piscinae*. Pengujian TPC menggunakan metode *spread plate* dengan media selektif yang digunakan untuk *B. stercoris* berupa *Mannitol Egg Yolk Polymixin* (MYP) dan untuk *C. piscinae* menggunakan media selektif berupa *Tryptic Soy Agar* (TSA). Hasil uji TPC dari bakteri *B. stercoris* disajikan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Uji TPC Tanaman *Tradescantia pallida* dengan Bakteri *Bacillus stercoris* Hari Ke-0 dan Ke-28

Pengujian TPC									
Perlakuan	Sampel	Pengulangan	Hari Ke-0				Hari Ke-28			
			Pengulangan							
			10^{-1}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-1}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}
Tanpa Penambahan Bakteri	*Tradescantia pallida* + *Bacillus stercoris*	1	12	8	1	7	-	3	2	1
		2	17	11	6	8	-	5	3	1
	Tradescantia pallida + Kontrol	1	2	0	1	1	-	3	2	0
		2	1	2	0	4	-	2	5	0
Penambahan Bakteri	*Tradescantia pallida* + *Bacillus stercoris*	1	-	54	0	1	-	26	5	2
		2	-	44	12	1	-	10	5	3
	Tradescantia pallida + Kontrol	1	-	4	0	0	-	8	2	2
		2	-	1	0	6	-	5	1	3

Berdasarkan **Tabel 1.** hasil uji TPC menunjukkan bahwa reaktor dengan penambahan *B. stercoris* memiliki jumlah koloni yang jauh lebih tinggi dibandingkan reaktor tanpa bakteri, baik pada hari ke-0 maupun hari ke-28. Pada hari ke-0, jumlah koloni pada pengenceran 10^{-1} mencapai54 dan 44 koloni, sedangkan pada reaktor tanpa bakteri hanya 12 dan 17 koloni. Kondisi ini masih konsisten hingga hari ke-28, di mana reaktor dengan bakteri mempertahankan jumlah koloni yang lebih tinggi, yaitu 26 dan 18 koloni, dibandingkan dengan reaktor kontrol, yaitu 3 dan 5 koloni. Hasil tersbeut menunjukkan bahwa inokulasi *B. stercoris* efektif dalam meningkatkan dan mempertahankan

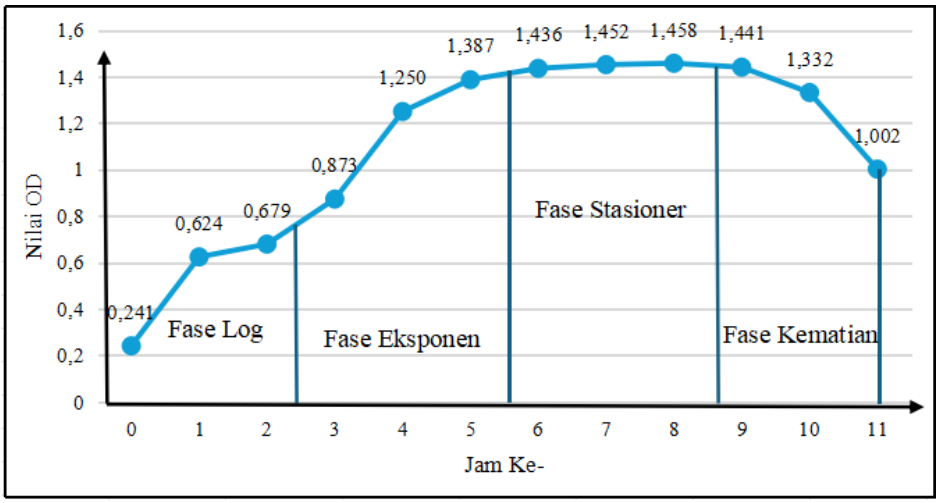
This journal is © Marsono, et al. 2026

populasi mikroba selama periode inkubasi. Sebaliknya, reaktor kontrol tanpa penambahan bakteri hanya menunjukkan 1–2 koloni pada pengenceran yang sama, mencerminkan aktivitas mikroba yang sangat rendah pada awal waktu. Keberadaan tanaman *T. pallida* kemungkinan juga mendukung pertumbuhan mikroba melalui suplai senyawa organik hasil dekomposisi biomassa.

Stabilitas populasi *B. stercoris* selama masa inkubasi kemungkinan besar disebabkan oleh sifat adaptif bakteri tersebut terhadap kondisi lingkungan *red mud* yang ekstrem. Sebagai bakteri *indigenous*, *B. stercoris* diketahui memiliki toleransi tinggi terhadap paparan logam berat, kondisi pH basa, serta suhu lingkungan yang fluktuatif. Kemampuan adaptasi ini memungkinkan bakteri untuk bertahan hidup dan berintegrasi dengan komunitas mikroba asli yang telah ada sebelumnya, sehingga mendukung keberlanjutan populasi hingga akhir penelitian.

Secara visual, pengamatan terhadap media MYP pada pengenceran 10^{-1} yang diinkubasi selama 24 jam menunjukkan perubahan warna dari merah menjadi kuning. Perubahan ini menandakan adanya aktivitas metabolik *B. stercoris* dalam memfermentasi mannitol, menghasilkan senyawa asam yang menurunkan pH media. Fenol merah sebagai indikator pH dalam media berubah warna sebagai respon terhadap penurunan pH, mengindikasikan produksi metabolit asam (Neogen, 2024). Aktivitas ini juga menjadi indikasi adanya sintesis hormon *indole-3-acetic acid* (IAA) oleh *B. stercoris*, sebagaimana dijelaskan oleh Pengproh *et al.* (2023), yang berperan dalam menurunkan pH di zona rizosfer serta meningkatkan kelarutan dan bioavailabilitas logam berat di dalam tanah.

Pengukuran nilai OD pada larutan bakteri dilakukan untuk menilai tingkat kekeruhan kultur, yang merefleksikan kepadatan populasi sel. Semakin tinggi tingkat kekeruhan, maka jumlah bakteri yang tumbuh juga semakin banyak, sehingga nilai OD yang terukur akan meningkat secara proporsional (Uthami & Indrawati., 2024). Hasil pengamatan nilai OD bakteri *B. stercoris* ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 1. dan *C. piscinae* dalam Gambar 2.



Gambar 1. Grafik Pertumbuhan *Bacillus stercoris*

Gambar 1. menunjukkan pola pertumbuhan bakteri *B. stercoris* yang terdiri dari empat fase utama. Pada fase log (jam ke-1 hingga ke-2), terjadi peningkatan nilai OD dari 0,241 menjadi 0,679 yang menandakan awal aktivitas metabolik dan pembelahan sel. Fase eksponen berlangsung dari jam ke-3 hingga ke-5, dengan pertumbuhan cepat dan konsisten, ditandai peningkatan OD hingga mencapai 1,837. Selanjutnya, fase stasioner terjadi pada jam ke-6 hingga ke-9, di mana

pertumbuhan sel mencapai titik maksimum dan nilai OD stabil pada kisaran 1,436–1,458, menandakan keseimbangan antara jumlah sel yang hidup dan mati. Memasuki jam ke-10 hingga ke-11, terjadi penurunan nilai OD menjadi 1,002, menunjukkan fase kematian akibat penurunan nutrisi dan akumulasi produk metabolit toksik. Pola ini menggambarkan dinamika pertumbuhan *B. stercoris* yang dapat menjadi dasar penentuan waktu inokulasi optimal, serta penting untuk pemilihan fase karena pada fase matang memiliki potensi pertumbuhan ulang yang tinggi saat dipindahkan ke media baru, meskipun memiliki risiko menimbulkan kompetisi nutrisi dengan tanaman atau mikroba lain (Rolfe *et al*., 2011).

Selain *B. stercoris*, uji TPC juga dilakukan terhadap bakteri *C. psicinae* untuk dilihat dinamika pertumbuhan bakteri. Hasil uji TPC bakteri *C. piscinae* dengan tanaman *P. hederaceum* ditampilkan dalam **Tabel 2**.

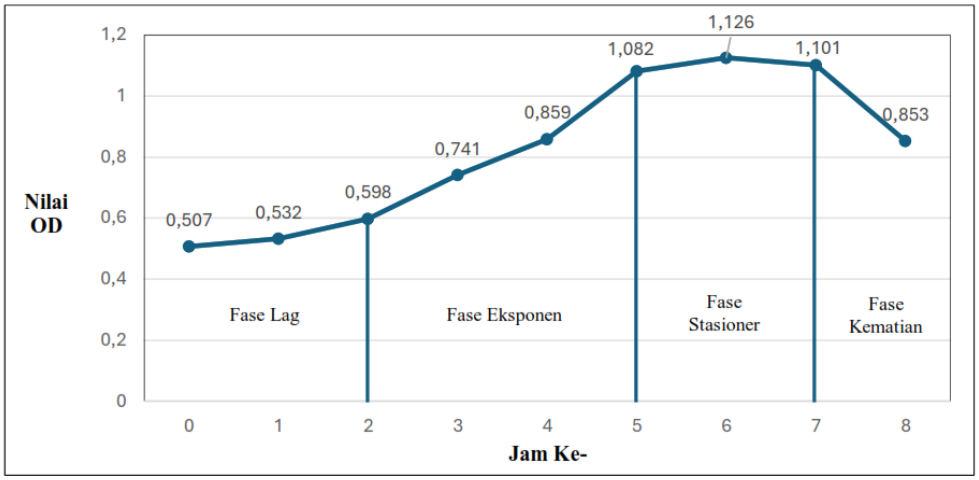
Tabel 2. Hasil Uji TPC Tanaman *Philodendron hederaceum* dengan Bakteri *Chromobacterium piscinae* Hari Ke-0 dan Ke-28

Pengujian TPC									
Perlakuan	**Sampel**	**Pengulangan**	**Hari Ke-0**				**Hari Ke-28**			
			Pengulangan							
			10^{-1}	**10^{-3}**	**10^{-5}**	**10^{-7}**	**10^{-1}**	**10^{-3}**	**10^{-5}**	**10^{-7}**
Tanpa Penambahan Bakteri	*Philodendron hederaceum* + *Chromobacterium piscinae*	1	254	140	-*	83	281	183	-*	71
		2	231	-*	162	-*	264	168	141	65
	Philodendron hederaceum + Kontrol	1	-*	174	-*	71	226	-*	152	82
		2	248	-*	124	89	252	164	-*	77
Penambahan Bakteri	*Philodendron hederaceum* + *Chromobacterium piscinae*	1	-	-*	127	68	-	175	136	89
		2	-	142	109	81	-	166	-*	92
	Philodendron hederaceum + Kontrol	1	-	136	129	-*	-	174	136	96
		2	-	-*	103	76	-	173	-*	83

Keterangan : Tanda (*) menunjukkan perhitungan koloni >300 atau *spreader*

Berdasarkan **Tabel 2**, menunjukkan hasil uji TPC pada hari ke-0, dimana reaktor dengan penambahan *C. piscinae* menunjukkan jumlah koloni yang lebih tinggi dibandingkan reaktor tanpa inokulasi. Pada pengenceran 10^{-1}, jumlah koloni mencapai 254 dan 231, sedangkan kontrol hanya berkisar antara 136 hingga 248 koloni. Pertumbuhan koloni yang tinggi juga terlihat pada pengenceran 10^{-3} dan 10^{-5}, namun beberapa hasil ditandai dengan tanda (*) yang menunjukkan jumlah koloni lebih dari 300 atau terdapatnya spreader. Sesuai dengan Anas et al. (2020), data TPC yang valid berada dalam rentang 30–300 koloni per cawan, sehingga hasil di luar kisaran ini tidak dapat digunakan dalam analisis kuantitatif. Selain itu, spreader, yakni pertumbuhan bakteri yang menyatu dan meluas di permukaan media juga menyebabkan kegagalan pembacaan, sebagaimana dijelaskan oleh Amaliah et al. (2018), dan tidak dapat dijadikan sumber isolat. Meskipun demikian, tren umum tetap menunjukkan bahwa inokulasi *C. piscinae* berkontribusi dalam mempertahankan populasi mikroba secara konsisten hingga hari ke-28, dengan koloni yang tetap tinggi pada pengenceran 10^{-1} dan 10^{-3}, yaitu 281 dan 183 koloni. Hasil ini mengindikasikan bahwa *C. piscinae* mampu tumbuh dan beradaptasi dengan baik di lingkungan red mud, serta memiliki potensi untuk mendukung proses bioremediasi melalui aktivitas mikroba

yang stabil.



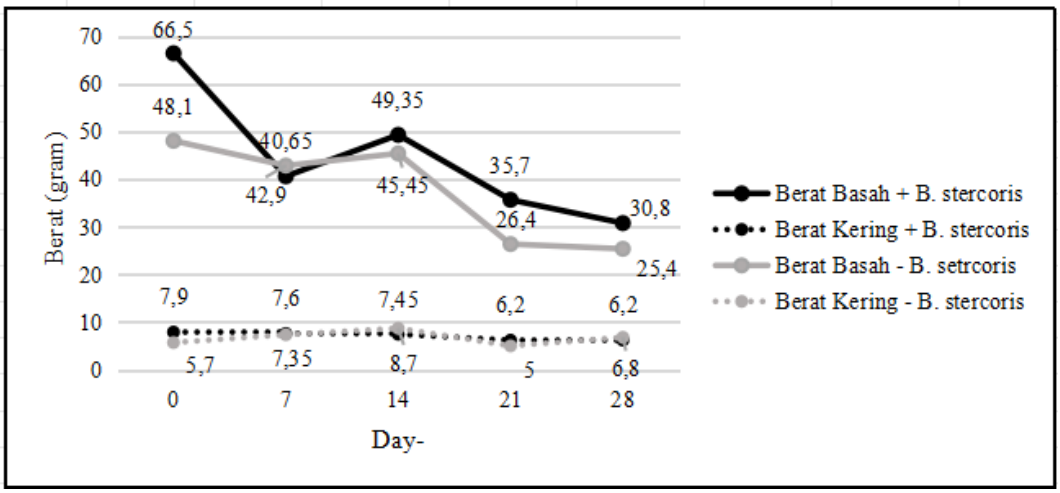
Gambar 2. Grafik Pertumbuhan Bakteri *Chromobacterium piscinae*

Gambar 2. menunjukkan pola khas pertumbuhan bakteri *C. piscinae* dengan empat fase utama. Fase lag terjadi pada jam ke-0 hingga ke-2, diikuti fase eksponensial antara jam ke-3 hingga ke-4 dengan peningkatan tajam nilai OD. Fase stasioner terlihat pada jam ke-5 hingga ke-6 dengan OD tertinggi 1,126, lalu dilanjutkan fase kematian pada jam ke-7 hingga ke-8, ditandai dengan penurunan OD menjadi 0,853. Pola ini mencerminkan pertumbuhan cepat namun disusul penurunan viabilitas akibat keterbatasan nutrisi.

3.2 Parameter Pendukung

3.2.1 Berat Basah dan Berat Kering Tumbuhan

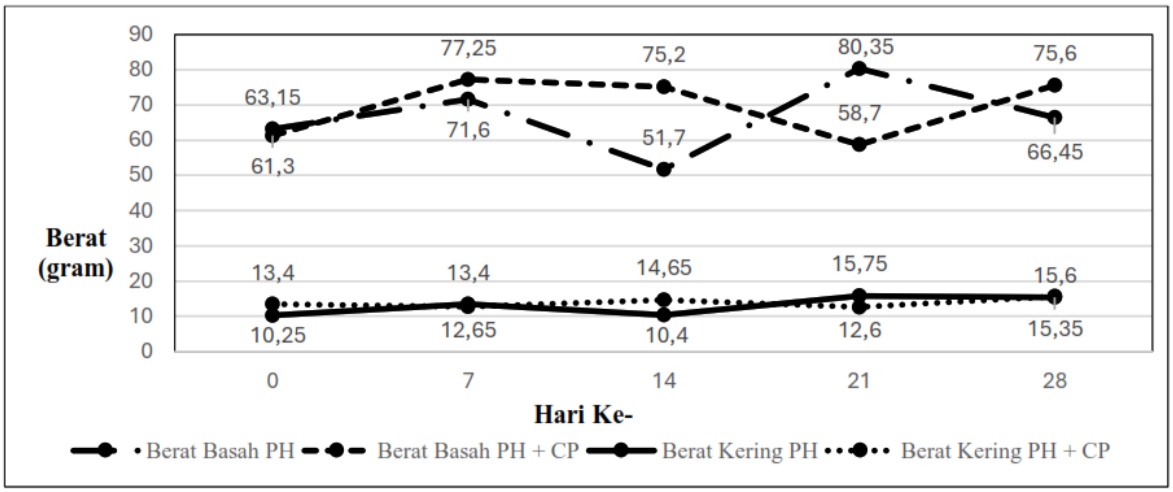
Berat basah dan berat kering penting dilakukan karena untuk mengukur kualitas pertumbuhan tanaman. Berat basah menjadi indikator awal untuk mengetahui kemampuan tanaman menyimpan air dan memperluas jaringan vegetatif, sedangkan berat kering menunjukan status nutrisi tanaman serta kapasitasnya dalam menyerap dan mengakumulasi unsur dari media tanam (Mansur & Baihaqi, 2022). Berikut merupakan tren berat basah dan berat kering dari tanaman *T. pallida* yang ditampilkan di Gambar 3. dan *P. hederaceum* pada Gambar 4.



Gambar 3. Tren Berat Basah dan Berat Kering Tanaman *Tradescantia pallida*

Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.503

Pada **Gambar 3**, menunjukkan dinamika berat basah dan berat kering tanaman *T. pallida* selama 28 hari dengan dan tanpa penambahan *B. stercoris*. Secara umum, tanaman yang diinokulasi dengan *B. stercoris* memiliki berat basah awal yang lebih tinggi, yaitu 66,5 gram pada hari ke-0, dibandingkan dengan tanaman tanpa bakteri yang hanya 48,1 gram. Namun, terjadi penurunan berat basah secara bertahap hingga hari ke-28, dengan sisa berat masing-masing sebesar 30,8 gram (dengan bakteri) dan 25,4 gram (tanpa bakteri). Penurunan ini mengindikasikan proses dekomposisi biomassa tanaman yang berlangsung selama masa fitoremediasi. Tren serupa juga terlihat pada berat kering, di mana nilai awal tanaman dengan *B. stercoris* lebih tinggi dan cenderung menurun hingga akhir periode, namun tetap lebih stabil dibandingkan kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan bakteri membantu memperlambat laju dekomposisi total tanaman melalui kemungkinan pengaruh terhadap keseimbangan kelembapan dan stabilitas jaringan tanaman. Secara keseluruhan, *B. stercoris* memberikan pengaruh positif terhadap biomassa tanaman, meskipun masih terjadi degradasi selama proses berlangsung.



Gambar 4. Tren Berat Basah dan Berat Kering Tanaman *Philodendron hederaceum*

Berdasarkan **Gambar 4**., tren berat basah dan berat kering tanaman *Philodendron hederaceum* menunjukkan adanya fluktuasi selama masa pengamatan 28 hari. Tanaman yang diberi perlakuan penambahan *Chromobacterium piscinae* pada *Philodendron hederaceum* umumnya memiliki berat basah yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman tanpa perlakuan bakteri, terutama pada hari ke-14 dan ke-21, yang masing-masing mencapai 77,25 g dan 80,35 g. Hal ini mengindikasikan bahwa kehadiran bakteri dapat berkontribusi positif terhadap peningkatan berat biomassa tanaman.

Untuk berat kering, pola yang serupa juga terlihat, di mana tanaman dengan perlakuan bakteri cenderung memiliki nilai berat kering yang lebih tinggi, meskipun selisihnya tidak terlalu besar. Peningkatan berat kering menunjukkan akumulasi biomassa nyata yang tidak bergantung pada kadar air. Puncak berat kering pada perlakuan *Philodendron hederaceum* dengan *Chromobacterium piscinae* terjadi pada hari ke-28 dengan nilai 15,35 g, dibandingkan dengan 15,6 g pada tanpa penambahan bakteri, yang menunjukkan bahwa pertumbuhan jaringan tanaman relatif seimbang menjelang akhir masa pengamatan. Secara keseluruhan, pemberian *C.*

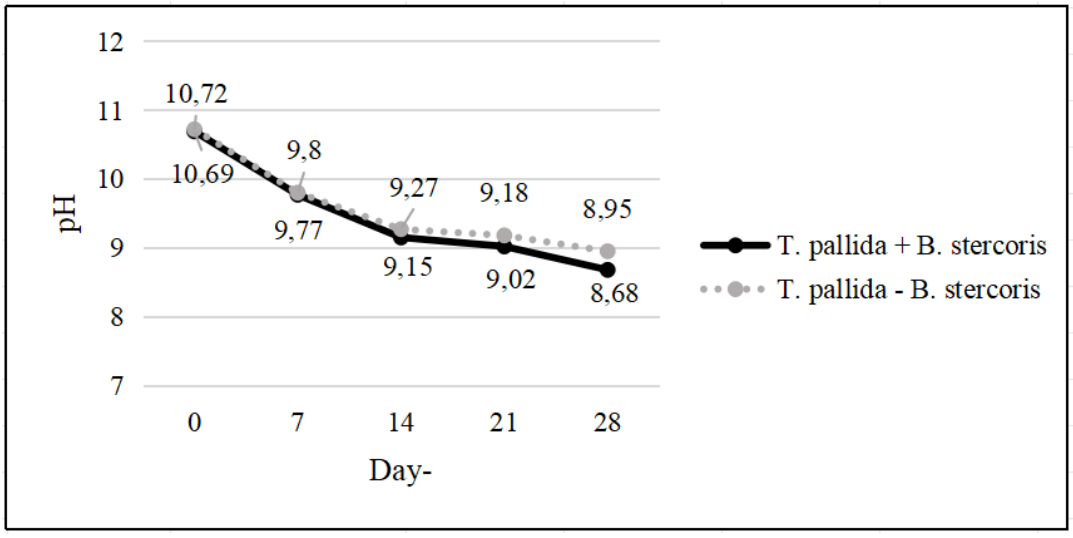
This journal is © Marsono, et al. 2026

piscinae menunjukkan potensi dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui peningkatan biomassa baik secara basah maupun kering.

Dalam hal ini, berat basah dan berat kering tanaman digunakan sebagai indikator penting untuk mengevaluasi pertumbuhan dan kemampuannya dalam menyerap kontaminan. Berat basah menunjukkan total biomassa termasuk air, sedangkan berat kering mencerminkan akumulasi senyawa hasil fotosintesis. Peningkatan berat kering menandakan efisiensi sintesis dan penyimpanan asimilat, yang dipengaruhi oleh ketersediaan air dan unsur hara seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan magnesium. Jika kebutuhan nutrisi dan air tercukupi, proses fotosintesis dan distribusi hasilnya berjalan optimal. Sebaliknya, kekurangan unsur tersebut dapat menghambat fotosintesis dan menimbulkan gangguan fisiologis tanaman (Sitorus dkk., 2014; Aryani dkk., 2022).

3.2.2 Analisis pH Media Tumbuhan

pH merupakan salah satu indikator penting dalam praktik *phytomining* karena pH memainkan peran langsung terhadap kelarutan logam berat terutama Cr, V, dan Sc dalam *red mud* dan kesehatan tanaman, serta peran tidak langsung terhadap naik turunnya nilai *Electrical Conductivity* (EC) yang memengaruhi kelarutan logam berat. *Potential hydrogen* (pH) diukur sebanyak 5 kali sesuai dengan jumlah sampling tanaman pada hari ke-0, hari ke-7, hari ke-14, hari ke-21, hari ke-28 berikut merupakan hasil pengamatan pH pada media tumbuhan penelitian. Adapun grafik pada **Gambar 5**. yang menunjukkan tren pH pada tanaman *Tradescantia pallida* dan *Bacillus stercoris*.

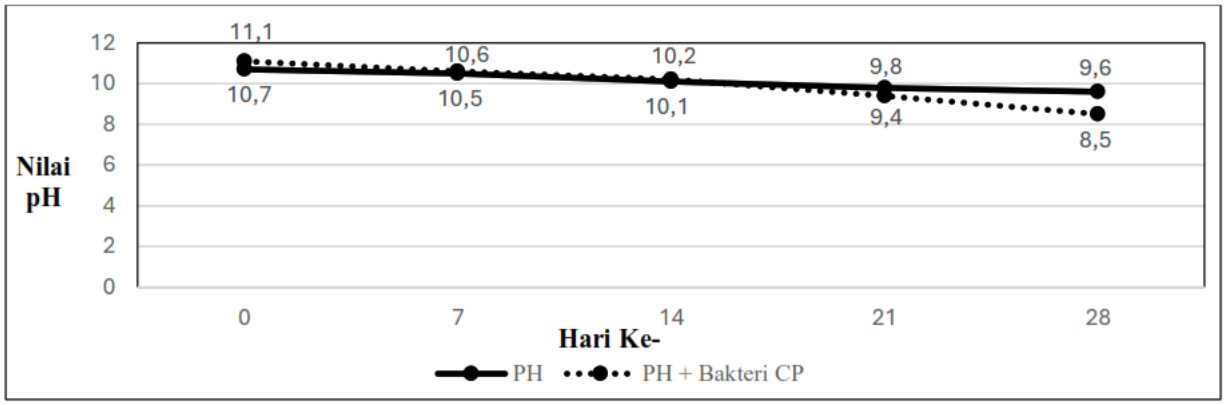


Gambar 5. Tren pH Tanaman *Tradescantia pallida* dengan *Bacillus stercoris*

Berdasarkan **Gambar 5**, terjadi penurunan nilai pH pada media tanam *Tradescantia pallida* selama 28 hari pengamatan, baik dengan maupun tanpa penambahan *Bacillus stercoris*. Pada hari ke-0, pH awal tergolong basa dengan nilai sekitar 10,72 dan 10,69. Seiring waktu, pH mengalami penurunan bertahap hingga mencapai kisaran 8,95 untuk perlakuan dengan bakteri dan 8,68 untuk tanpa bakteri pada hari ke-28. Penurunan pH ini dapat dikaitkan dengan aktivitas metabolik mikroorganisme dan tanaman, termasuk produksi asam organik selama proses bioremediasi. Kehadiran *Bacillus stercoris* tidak menyebabkan perbedaan signifikan terhadap tren penurunan pH, meskipun pada hari ke-28 perlakuan dengan bakteri menunjukkan nilai pH

yang sedikit lebih tinggi. Perubahan pH ini menunjukkan dinamika lingkungan mikro yang aktif dan menjadi indikator penting dalam efektivitas proses remediasi, karena pH yang lebih mendekati netral cenderung lebih optimal bagi aktivitas mikroba dan ketersediaan unsur hara di media tanam.

Adapun tren pH pada perlakuan tanaman *P. hederaceum* denga bakteri *C. piscinae*. Data tersebut ditampilkan dalam **Gambar 6**.



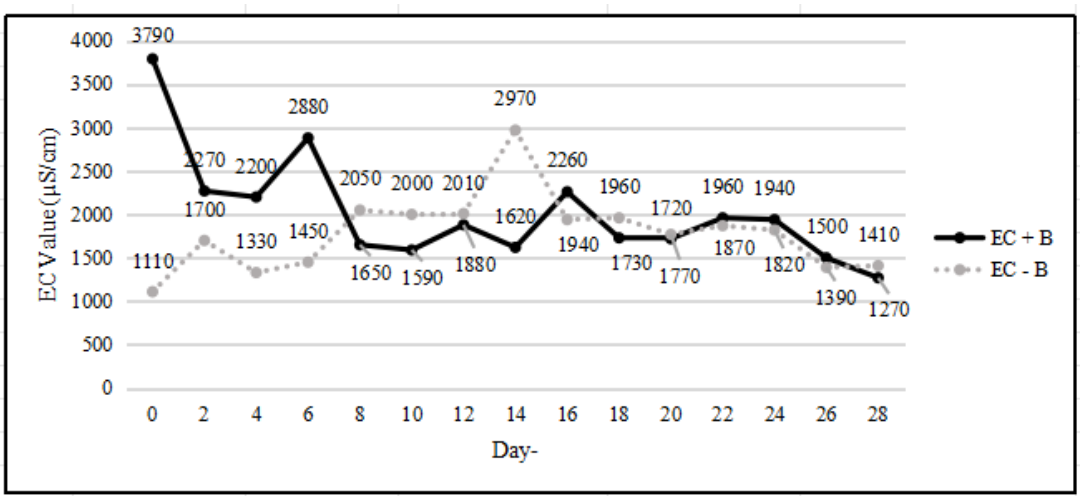
Gambar 6. Tren pH Tanaman *Philodendron hederaceum* dengan *Chromobacterium piscinae*

Berdasarkan **Gambar 6**, terjadi tren penurunan pH pada media tanam *P. hederaceum* selama periode 28 hari, baik pada perlakuan tanpa maupun dengan penambahan bakteri *C. piscinae*. Nilai pH awal berada pada kondisi basa, yaitu 11,1 untuk tanpa penambahan bakteri dan 10,7 untuk perlakuan dengan bakteri. Seiring waktu, pH secara bertahap menurun hingga mencapai 9,6 (tanpa penambahan bakteri) dan 8,5 (perlakuan dengan bakteri) pada hari ke-28. Penurunan pH ini menunjukkan terjadinya perubahan kimiawi di media tanam, yang diduga dipengaruhi oleh aktivitas respirasi akar dan bakteri, serta produksi senyawa asam organik sebagai hasil metabolisme. Adanya *C. piscinae* mempercepat penurunan pH, yang mengindikasikan bahwa aktivitas bakteri turut berperan dalam mereduksi kondisi basa ekstrem. Penyesuaian pH ke arah yang lebih netral ini penting untuk mendukung ketersediaan unsur hara dan aktivitas enzimatik mikroba serta tanaman dalam proses fitoremediasi.

Perubahan pH media tanam dipengaruhi oleh mekanisme kimia dan biologis. Peningkatan pH dapat terjadi karena pertukaran ion logam basa serta penyerapan senyawa asam oleh tanaman dengan bantuan mikroorganisme. Sebaliknya, penurunan pH umumnya disebabkan oleh aktivitas mikroba di zona akar yang menghasilkan senyawa asam seperti asam karbonat dari respirasi, sehingga meningkatkan keasaman media secara signifikan dalam waktu singkat (Ayu dkk., 2022; NNPS & Sari., 2018).

3.2.3 *Electrical Conductivity* (EC) Media Tumbuhan

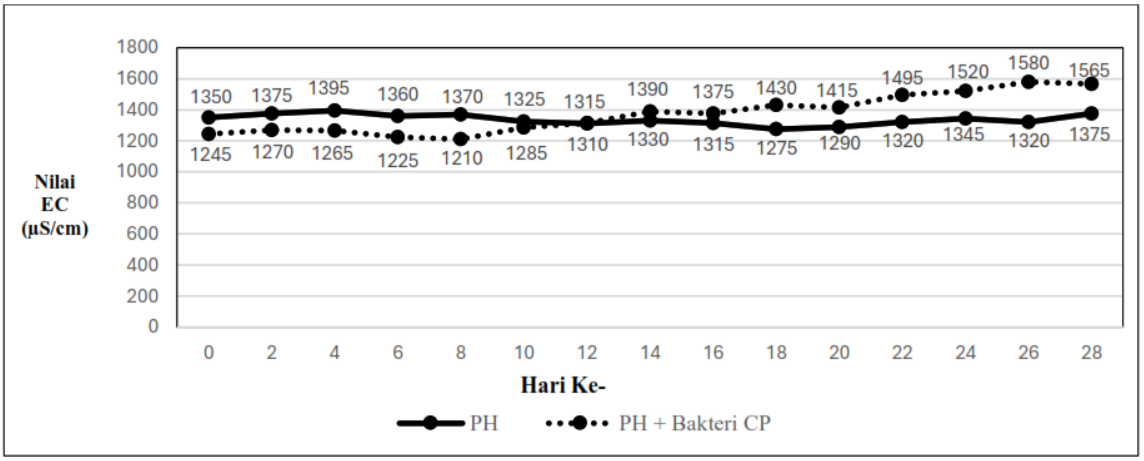
Hasil analisis konduktivitas listrik (EC) menunjukkan bahwa nilai EC pada media tanam *Tradescantia pallida* mengalami penurunan signifikan dari hari ke-0 hingga hari ke-28. Untuk mengidentifikasi pola fluktuasi yang terjadi selama periode tersebut, data pengamatan disajikan dalam bentuk visual pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Grafik Tren EC Tanaman *Tradescantia pallida* dengam *Bacillus stercoris*

Berdasarkan **Gambar 7**, nilai EC tanaman *T. pallida* menunjukkan fluktuasi yang cukup signifikan selama 28 hari pengamatan. Pada perlakuan dengan penambahan *B. stercoris*, nilai EC awalnya sangat tinggi, mencapai 3790 µS/cm pada hari ke-0, kemudian menurun drastis pada hari ke-2 dan terus mengalami fluktuasi, namun cenderung menurun hingga mencapai 1410 µS/cm pada hari ke-28. Sementara itu, pada perlakuan tanpa penambahan bakteri, nilai EC juga menunjukkan tren penurunan yang lebih stabil, dari 1110 µS/cm menjadi 1270 µS/cm.

Penurunan nilai EC ini menunjukkan adanya pengurangan konsentrasi ion terlarut dalam media tanam, yang mengindikasikan aktivitas biologis tanaman dan mikroorganisme dalam menyerap dan mengakumulasi unsur hara dari media. Aktivitas *B. stercoris* diduga berkontribusi terhadap fluktuasi nilai EC karena kemampuan bakteri dalam memobilisasi unsur hara atau melarutkan senyawa tertentu di dalam media. Meskipun awalnya EC tinggi, proses penyerapan dan transformasi ion secara bertahap menyebabkan penurunan nilai EC. Hal ini mencerminkan keberhasilan proses fitoremediasi, karena semakin rendah nilai EC menunjukkan berkurangnya kontaminan atau ion-ion logam berat dari media tanam.



Gambar 8. Grafik Tren EC Tanaman *Philodendron hederaceum* dengan *Chromobacterium piscinae*

Berdasarkan **Gambar 8**, tren nilai EC pada media tanam *P. hederaceum* dengan penambahan *C. piscinae* menunjukkan fluktuasi yang relatif stabil selama 28 hari pengamatan. Perlakuan tanpa bakteri memiliki rentang nilai EC antara 1270 hingga 1580 µS/cm, sedangkan perlakuan dengan bakteri *C. piscinae* menunjukkan kisaran yang sedikit lebih rendah, yaitu 1210 hingga 1375 µS/cm. Nilai EC cenderung meningkat secara bertahap terutama setelah hari ke-14, khususnya pada perlakuan tanpa bakteri.

Hal tersebut sesuai dengan pernyataan yang dijelaskan oleh Salimi *et al*. (2012), bahwa tingginya niai EC disebabkan oleh tanaman yang mengalami stres akibat akumulasi logam berat yang berlebihan, sehingga merespons dengan melepaskan logam ke media melalui eksudat asam organik. Asam tersebut dapat melarutkan logam yang terikat pada partikel tanah dan meningkatkan kelarutan ion. Selain itu, disebabkan oleh fluktuasi pH tanah yang menyebabkan beberaoa jenis ion menjadi lebih mudah larut, sehingga turut mempengaruhi pengingkatan EC.

3.3 Ekstraksi Logam

Translocation Factor (TF) dan *Bioconcentration Factor* (BCF) merupakan indikator penting untuk menilai efisiensi tanaman dalam menyerap, mengakumulasi, dan mentranslokasikan logam berat dari tanah ke jaringan tanaman. TF mengukur kemampuan tanaman dalam memindahkan logam berat dari akar menuju bagian atas tanaman seperti batang dan daun. Sementara itu, BCF merepresentasikan rasio akumulasi logam dari tanah ke seluruh bagian tanaman. Tanaman dikategorikan sebagai hiperakumulator apabila nilai BCF > 1, yang menandakan kemampuannya dalam menyerap logam secara efektif. Sebaliknya, BCF < 1 menunjukkan bahwa tanaman tersebut tidak mampu mengakumulasi logam berat dalam jumlah signifikan. Adapun hasil TF dan BCF tanaman *T. pallida* dengan *B. stercoris* yang tersajikan dalam **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil TF dan BCF Tanaman *Tradescantia pallida* dengan *Bacillus stercoris*

Jenis Tanaman	Logam Berat	Hari Ke-	Perlakuan	TF	BCF
Tradescantia pallida	Cr	7	Bakteri	3,11	0,06
			Tanpa Bakteri	1,6	0,04
		14	Bakteri	0,62	0,015
			Tanpa Bakteri	0,44	0,08
		21	Bakteri	1,04	0,06
			Tanpa Bakteri	1,69	0,06
		28	Bakteri	1,22	0,15
			Tanpa Bakteri	1,78	0,08
	V	7	Bakteri	2,04	0,13
			Tanpa Bakteri	1,22	0,09
		14	Bakteri	0,87	0,30
			Tanpa Bakteri	1,52	0,14
		21	Bakteri	1,31	0,13
			Tanpa Bakteri	1,23	0,18
		28	Bakteri	1,53	0,23
			Tanpa Bakteri	1,31	0,23
	Sc	7	Bakteri	0,83	0,19
			Tanpa Bakteri	1,01	0,05
		14	Bakteri	1,92	0,02

			Tanpa Bakteri	1,84	0,04
		21	Bakteri	0,91	0,07
			Tanpa Bakteri	1,57	0,04
		28	Bakteri	1,19	0,19
			Tanpa Bakteri	1,42	0,07

Berdasarkan **Tabel 3**, terlihat bahwa pemberian bakteri *B. stercoris* mempengaruhi nilai TF dan BCF logam Cr, V, dan Sc pada tanaman *T. pallida*. Nilai TF menunjukkan kemampuan tanaman untuk mentranslokasikan logam dari akar ke bagian atas tanaman (batang dan daun), sementara BCF mencerminkan kapasitas tanaman dalam menyerap logam dari media ke jaringan akar.

Pada logam Cr, perlakuan dengan bakteri menunjukkan peningkatan signifikan nilai TF pada hari ke-7, yaitu 3,11 dibandingkan tanpa bakteri, yaitu 1,6. Hal ini menunjukkan bahwa pada awal fase pertumbuhan, *B. stercoris* mampu meningkatkan mobilitas Cr ke bagian atas tanaman. Namun, nilai TF menurun secara bertahap hingga hari ke-21, kemudian meningkat kembali pada hari ke-28. Sebaliknya, nilai BCF Cr tidak menunjukkan peningkatan yang konsisten, dengan kisaran 0,04–0,08, mengindikasikan bahwa akumulasi logam di akar relatif rendah, baik dengan maupun tanpa bakteri.

Pada logam V, nilai TF dan BCF juga menunjukkan perbedaan mencolok antara perlakuan dengan dan tanpa bakteri. TF tertinggi terjadi pada hari ke-28, mencapai 1,53 dengan perlakuan penambahan bakteri, dibandingkan 1,31 perlakuan tanpa bakteri, menandakan peningkatan transpor logam yang berkelanjutan. Nilai BCF V meningkat secara progresif, dari 0,09 pada hari ke-7 menjadi 0,33 pada hari ke-28, yang mencerminkan efektivitas adsorpsi akar terhadap vanadium seiring waktu, terutama dengan keberadaan *B. stercoris*.

Sementara itu, untuk logam Sc, perlakuan dengan bakteri menghasilkan TF dan BCF yang lebih stabil dan tinggi, terutama pada hari ke-28, sekitar 1,42 untuk nilai TF dan 0,07 untuk nilai BCF. Hal ini menunjukkan bahwa *T. pallida* dengan dukungan bakteri memiliki kemampuan yang cukup baik dalam menyerap dan mentranslokasikan skandium dari *red mud*.

Secara keseluruhan, kehadiran *B. stercoris* meningkatkan efektivitas tanaman dalam menyerap dan mendistribusikan logam, terutama V dan Sc, baik melalui peningkatan ketersediaan logam di rhizosfer maupun melalui stimulasi fisiologis tanaman. Hasil ini menguatkan potensi *T. pallida* sebagai agen fitoremediasi yang efektif dengan dukungan agen hayati.

Adapun nilai TF dan BCF dari tanaman *Phillodendron hederaceum* dengan bakteri *Chromobacterium piscinae* yang ditampilkan dalam **Tabel 4.**

Tabel 4. Hasil TF dan BCF Tanaman *Phillodendron hederaceum* dengan *Chromobacterium piscinae*

Jenis Tanaman	Logam Berat	Hari Ke-	Perlakuan	TF	BCF
Philodendron hederaceum	Cr	7	Bakteri	0,24	2,81
			Tanpa Bakteri	0,19	2,74
		14	Bakteri	0,20	4,07
			Tanpa Bakteri	0,18	3,57
		21	Bakteri	0,20	5,14
			Tanpa Bakteri	0,22	5,03
		28	Bakteri	0,25	8,50
			Tanpa Bakteri	0,21	6,42
	V	7	Bakteri	0,14	1,69
			Tanpa Bakteri	0,23	1,24

DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.503

		14	Bakteri	0,14	2,34
			Tanpa Bakteri	0,21	1,75
		21	Bakteri	1,15	2,62
			Tanpa Bakteri	0,21	2,15
		28	Bakteri	0,17	3,08
			Tanpa Bakteri	0,22	2,80
	Sc	7	Bakteri	0,16	0,05
			Tanpa Bakteri	0,19	0,03
		14	Bakteri	0,15	0,14
			Tanpa Bakteri	0,04	0,17
		21	Bakteri	0,17	0,20
			Tanpa Bakteri	0,08	0,24
		28	Bakteri	0,16	0,37
			Tanpa Bakteri	0,11	0,42

Berdasarkan **Tabel 4**, nilai TF dan BCF pada tanaman *P. hederaceum* dengan perlakuan *C. piscinae* menunjukkan pola yang bervariasi tergantung jenis logam dan waktu pengamatan. Untuk logam Cr, nilai TF relatif rendah baik dengan maupun tanpa perlakuan bakteri, berkisar antara 0,14–0,25, yang menunjukkan bahwa logam cenderung tertahan di akar dan tidak banyak ditranslokasikan ke bagian atas tanaman. Meskipun demikian, nilai BCF menunjukkan peningkatan signifikan dari hari ke-7 hingga hari ke-28, terutama pada perlakuan dengan bakteri, yaitu mencapai 8,50 dibandingkan 6,42 tanpa bakteri. Hal ini menunjukkan bahwa *C. piscinae* berperan penting dalam meningkatkan akumulasi Cr di jaringan akar.

Pada logam V, pola TF menunjukkan perbedaan mencolok antara perlakuan bakteri dan tanpa bakteri. Nilai TF tertinggi memiliki nilai 1,15 terjadi pada hari ke-21 dengan bakteri, menandakan efektivitas tinggi dalam mentranslokasikan logam V ke jaringan atas tanaman. Nilai BCF juga cenderung lebih tinggi pada perlakuan dengan bakteri, mencapai 3,08 pada hari ke-28, dibandingkan 2,40 tanpa bakteri. Hal ini menunjukkan bahwa *C. piscinae* tidak hanya meningkatkan penyerapan logam V dari media, tetapi juga mendorong distribusinya ke seluruh bagian tanaman.

Sementara itu, untuk logam Sc, nilai TF dan BCF cenderung rendah dan tidak menunjukkan perbedaan signifikan antara perlakuan. TF maksimum tercatat sebesar 0,22 pada hari ke-21 tanpa bakteri, dan BCF hanya mencapai 0,34. Hal ini mengindikasikan bahwa *P. hederaceum* memiliki kapasitas rendah dalam menyerap dan mentranslokasikan logam Sc, baik dengan maupun tanpa kehadiran *C. piscinae*.

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa *C. piscinae* memberikan pengaruh positif yang lebih kuat terhadap bioakumulasi logam Cr dan V dibandingkan Sc. Khususnya untuk Cr, bakteri ini mampu meningkatkan BCF secara signifikan meskipun TF tetap rendah, sedangkan untuk V, keduanya meningkat secara bersamaan. Ini mengindikasikan bahwa *P. hederaceum* merupakan kandidat fitoremediasi yang lebih efektif untuk logam V dan Cr dengan dukungan agen hayati seperti *C. piscinae*.

Berdasarkan acuan dari Sari *et al*. (2023), tanaman dikatakan memiliki potensi fitoremediasi apabila TF dan BCF > 1. Dengan demikian, *T. pallida* lebih dominan sebagai fitotranslokator, terutama untuk Cr dan V, karena nilai TF tinggi, sedangkan *P. hederaceum* berperan lebih kuat sebagai fitostabilisator, terutama untuk Cr, karena nilai BCF yang tinggi namun TF rendah. Untuk logam Sc, kedua tanaman menunjukkan nilai TF dan BCF yang umumnya <1, yang berarti potensi fitoremediasinya terhadap unsur ini masih terbatas.

This journal is © Marsono, et al. 2026

4. CONCLUSION

Pendekatan kombinatif antara *phytomining* dan bioaugmentasi menggunakan *T. pallida–B. stercoris* serta *P. hederaceum–C. piscinae* terbukti meningkatkan efektivitas remediasi logam Cr, V, dan Sc dari *red mud*. Inokulasi bakteri mendukung pertumbuhan tanaman, menstimulasi aktivitas mikroba, serta menurunkan pH dan EC media. *T. pallida* berperan sebagai fitotranslokator untuk logam Cr dan V karena nilai TF > 1, dengan nilai TF untuk logam Cr mencapai 3,11 dan logam V mencapai 2,04. Sementara itu, *P. hederaceum* menunjukkan karakter sebagai fitostabilisator, dengan nilai BCF tinggi untuk logam Cr yang mencapai 8,50. Potensi remediasi untuk Sc masih terbatas. Pendekatan ini menunjukkan prospek aplikatif dan berkelanjutan dalam pengelolaan limbah *red mud* berbasis teknologi ramah lingkungan.

REFERENCES

Aryani, R. D., Basuki, I. F., Budisantoso, I., & Widyastuti, A. (2022). Pengaruh Ketinggian Tempat terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanam Cabai Rawit (Capsicum frutescens L.). *Agriprima*, 6(2), 202-211.

Ayu, M. P., Ma'ruf, S. A. Q., Fariz, T. R., & Heriyanti, A. P. (2022, August). Fitoremediasi Air Limbah Rumah Tangga dengan Pemanfaatan Tanaman Lidah Mertua (Sansevieria) dan Sirih Gading (*Epipremnum aureum*). *In Proceeding Seminar Nasional IPA*, pp. 291-296.

Fitranto, I., Tangahu, B. V., Yulikasari, A., Mashudi, Titah, H. S., Najib Rizal, M., Salsabilla, F., Lam, Y. M., Wang, Y., In, H., & Soesilo, M. M. (2025). Effectiveness of Phytomining of Vanadium (V) and Chromium (Cr) Using *Cymbopogon citratus* and *Portulaca grandiflora* in Red Mud with Manure Addition. *BIO Web of Conferences*, *157*, Article 03003.

Hakim, G. L., Prasetya, A., Mulyono, P., & Petrus, H. T. B. M., 2024. Studi Optimasi Komposisi Red Mud dan Asam Sitrat untuk Phytomining. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, Volume 16(2), pp. 90-96.

Irfan, M., & Jufri, I. (2021). Total Plate Count (TPC) Dangke yang Dibuat Dengan Berbagai Level Getah Pepaya Kering dan Suhu Pemanasan. *Jurnal Sains dan Teknologi Industri Peternakan*, *1*(2), 22-23.

Jufri, R. F. (2020). Microbial isolation. *Journal La Lifesci*, 1(1), 18-23.

Kikis, C., Thalassinos, G., & Antoniadis, V., 2024. Soil Phytomining: Recent Developments—A Review. *Soil Systems*, 8(1), 1-34.

Kurniawan, S. B., Ramli, N. N., Said, N. S. M., Alias, J., Imron, M. F., Abdullah, S. R. S., ... & Hasan, H. A. (2022). Practical limitations of bioaugmentation in treating heavy metal contaminated soil and role of plant growth promoting bacteria in phytoremediation as a promising alternative approach. *Heliyon*, 8(4).

Liu, X., Han, Y., He, F., Gao, P., & Yuan, S. (2021). Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud-A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126542.

Liu, Y., & Naidu, R. (2014). Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. *Waste management*, 34(12), 2662-2673.

NNPS, R. I. N., & Sari, D. P. (2018). Analisis Nilai Ph dan Konsentrasi Logam Besi (Fe) Pada Media Lahan Basah Buatan Aliran Horizontal Bawah Permukaan yang Mengolah Air Saluran Reklamasi. *EnviroScienteae*, *14*(3), 200-210.

Mansur, I., & Baihaqi, M. R. (2022). Pengaruh Pemberian Kompos Terhadap Pertumbuhan Bibit Ylang-Ylang (Cananga odorata forma genuine). *Journal of Tropical Silviculture*, 13(02), 140-147.

Odoh, C. K., Zabbey, N., Sam, K., & Eze, C. N. (2019). Status, progress and challenges of phytoremediation-An African scenario. *Journal of environmental management*, 237, 365-378.

Oprčkal, P., Mladenovič, A., Zupančič, N., Ščančar, J., Milačič, R., & Zalar Serjun, V. (2020). Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash. *Journal of Cleaner Production*, 256, 1-10.

Pengproh, R., Thanyasiriwat, T., Sangdee, K., Saengprajak, J., Kawicha, P., & Sangdee, A. (2023). Evaluation and genome mining of Bacillus stercoris isolate B. PNR1 as potential agent for fusarium wilt control and growth promotion of tomato. *The Plant Pathology Journal*, 39(5), 430.

Purwadi, I., Erskine, P. D., Hutahaean, B. P., Wijaya, T. R., Nurtjahya, E., & vander Ent, A., 2024. Rare earth elements (REEs) in soils and plants of Bangka Island (Indonesia) focussing on (hyper) accumulation. *Plant and Soil*, 1-15.

Rolfe, M. D., Rice, C. J., Lucchini, S., Pin, C., Thompson, A., Cameron, A. D., ... & Hinton, J. C. (2012). Lag phase is a distinct growth phase that prepares bacteria for exponential growth and involves transient metal accumulation. *Journal of bacteriology*, 194(3), 686-701.

Salimi, M., Amin, M. M., Ebrahimi, A., Ghazifard, A., & Najafi, P. (2012). Influence of electrical conductivity on the phytoremediation of contaminated soils to Cd^{2+} and Zn^{2+}. *International Journal of Environmental Health Engineering (IJEHE)*, 1(March), 57-62.

Sari, S. H. J., Yona, D., Vidayanti, V., & Ramadhan, F. (2023). Effectivity of bioaccumulation and translocation of heavy metals (Cd, Zn, and Pb) in Avicennia Marina Growing At Wonorejo Mangrove Ecosystem, East Surabaya. *Journal of Environmental Engineering and Sustainable Technology*, 10(02), 104-111.

Sitorus, U. K. P., Siagian, B., & Rahmawati, N. (2014). Respons pertumbuhan bibit kakao (Theobroma cacao L.) terhadap pemberian abu boiler dan pupuk urea pada media pembibitan. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*, 2(3), 99543.

Siyar, R.; Doulati Ardejani, F.; Norouzi, P.; Maghsoudy, S.; Yavarzadeh, M.; Taherdangkoo, R.; Butscher, C. (2022). Phytoremediation Potential of Native Hyperaccumulator Plants Growing on Heavy Metal-Contaminated Soil of Khatunabad Copper Smelter and Refinery, Iran. *Water*, 14(22).

Uthami, F. N., & Irdawati, I., 2024. Karakteristik pola pertumbuhan bakteri termofilik isolat MS-12 dari sumber air padas mudiak sapan. *MASALIQ,* Volume 4(1), pp. 344-351.

Yulikasari, A., Tangahu, B. V., Nurhayati, E., Arliyani, I., Titah, H. S., Lam, Y. M., & Wang, Y. (2024). A comprehensive review of integrated phytoremediation and nanoparticle methods for heavy metal in red mud. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 288, 1-17.

Zaharah, T. A., Rossalina, W., & Silalahi, I. H. (2021). KOMPOSISI UNSUR DAN KARAKTERISASI MINERAL MAGNETIK DALAM RED MUD, RESIDU BAUKSIT DI PT. INDONESIA CHEMICAL ALUMINA (ICA) KALIMANTAN BARAT. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 4(3), 139-144.

Zinoveev, D., Pasechnik, L., Fedotov, M., Dyubanov, V., Grudinsky, P., & Alpatov, A. (2021). Extraction of valuable elements from red mud with a focus on using liquid media—a review. *Recycling*, 6(2), 38.