Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.500

RESEARCH ARTICLE / REVIEW ARTICLE

OPEN ACCESS

Check for updates

PHYTOMINING LOGAM Cr, V, DAN Sc YANG DITINGKATKAN SECARA MIKROBIAL : KAJIAN PERAN BIOSTIMULAN *INDIGENOUS* DALAM PROSES *UPTAKE* LOGAM OLEH TANAMAN HIAS

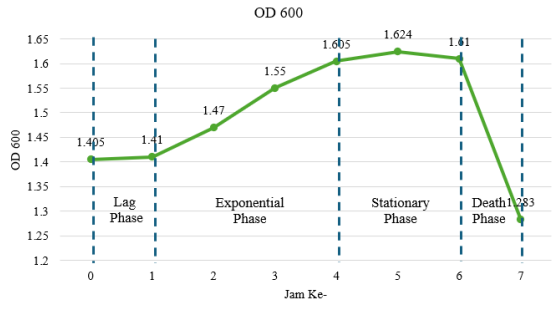
Article history
Received
26 July 2025
Received in revised form
27 July 2025
Accepted
27 July 2025
Published online
29 July 2025

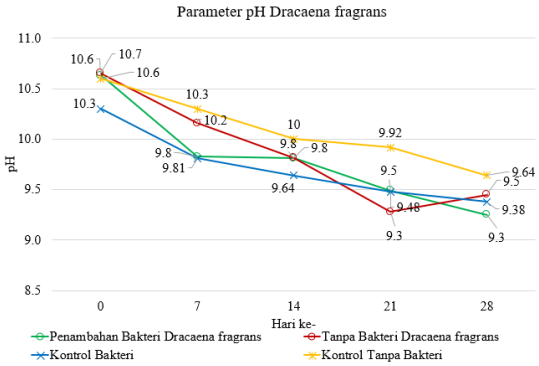
Muhammad Alif Ramadhani[1)], Bieby Voijant Tangahu[1,2*)] Renaldo Lazuardy[1)], Isni Arliyani[1,2)]

[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

*Corresponding author
voijant@its.ac.id

Graphical abstract





ABSTRACT

Red mud merupakan limbah pemurnian bauksit yang mengandung logam kromium (Cr), vanadium (V), dan skandium (Sc) yang berpotensi dimanfaatkan melalui *phytomining*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas *phytomining* menggunakan tanaman *Dracaena fragrans* dengan bioaugmentasi bakteri *Bacillus proteolyticus*. Media tanam terdiri atas 90% *red mud* dari PT Indonesia Chemical Alumina dan 10% pupuk kandang. Penelitian dilakukan selama 28 hari dengan pengamatan pH, *Electrical Conductivity* (EC), biomassa tanaman, serta pertumbuhan bakteri melalui *Optical Density* (OD) dan *Total Plate Count* (TPC). Hasil menunjukkan bahwa *B. proteolyticus* mencapai fase stasioner pada jam ke-4 hingga ke-6 dengan jumlah koloni tertinggi 54.000 CFU/mL. Penurunan pH dan EC mengindikasikan perubahan kondisi kimia media akibat aktivitas biologis. Nilai *Translocation Factor* (TF) tertinggi diperoleh pada Cr sebesar 8,74 pada hari ke-7, sedangkan TF untuk V dan Sc kurang dari 1. Hasil ini menunjukkan potensi *D. fragrans* dalam translokasi Cr melalui pendekatan *phytomining* berbasis bioaugmentasi.

Keywords: Airport, Sewerage Systems, Wastewater, Wastewater Treatment, Wastewater Treatment Plant.

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

Aktivitas pertambangan menghasilkan material yang dibutuhkan untuk memenuhi keperluan industri, di sisi lain juga menghasilkan limbah yang kerap menjadi permasalahan lingkungan. Salah satunya adalah aktivitas pertambangan dan pengolahan bauksit, yang mana menghasilkan lumpur merah atau *red mud* dari proses pemurnian alumina (Chen *et al.*, 2022). Limbah ini tidak hanya berpotensi mencemari tanah, tetapi juga dapat mengakibatkan kontaminasi pada air tanah (Qi *et al.*, 2022). Data terbaru di tahun 2020 menunjukkan terdapat 4 miliar ton tumpukan *red mud* di seluruh dunia (Swain *et al.*, 2022), sehingga permasalahan ini cukup memerlukan atensi untuk segera ditangani.

Limbah *red mud* ini dikategorikan ke dalam kelompok limbah B3 berdasarkan karakteristiknya. Hal ini telah disahkan dalam peraturan di Indonesia dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 18 Tahun 1999 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (1999). *Red mud* memiliki kandungan besi oksida yang tinggi (26-54%), sifat alkalinitas yang tinggi (pH 10-13) dan kandungan logam Na (3-6%) dan Al (17-22%) yang bersifat toksik bagi lingkungan (Keller *et al.*, 2020; Mishra & Pandey, 2019; Salman *et al.*, 2021). Secara komposisi, *red mud* terdiri dari Fe_2O_3, $AlNa_{12}SiO_5$, TiO_2, $CaCO_3$, $CaO\text{-}Al_2O_3$, NaOH, Sc, Cr dan V (Mishra & Pandey, 2019; Rossalina *et al.*, 2021).

Phytomining merupakan salah satu solusi yang dapat ditawarkan untuk mengatasi permasalahan *red mud*. Sebagai bentuk pemanfaatan limbah *red mud* dengan tujuan mengekstraksi logam berharga di dalamnya melalui proses *phytomining*. Teknik ini bertujuan untuk memulihkan logam dari tanah yang terkontaminasi melalui tahapan penanaman, pemanenan dan pemrosesan tanaman hiperakumulator logam (Dang & Li, 2022). Tanaman hiperakumulator merupakan tanaman dengan kemampuan untuk mengakumulasi logam dan metaloid tinggi dalam jaringannya tanpa adanya stres fisiologis (Purwadi *et al.*, 2024). Teknologi ini tergolong ramah lingkungan dan minim biaya untuk proses ekstraksi logam berharga, seperti logam kromium (Cr) dan vanadium (V). *Dracaena fragrans* telah dilaporkan sebagai tanaman hiperakumulator dengan spektrum serapan logam yang cukup luas, meliputi Zn, Pb dan Cu (Le *et al.*, 2021).

Red mud tergolong ke tanah kritis bagi tanaman, sehingga perlu adanya penambahan substansi yang mampu mengondisikan agar proses *phytomining* dapat berjalan dengan baik. Berdasarkan penelitian sebelumnya, penambahan pupuk kandang sejumlah 10% dari *red mud* menghasilkan proses *phytomining* yang optimum (Fitranto *et al.*, 2025). Selain itu, penambahan bioaugmentasi telah dilaporkan mampu mengurangi efek toksisistas logam berat pada tanaman (Bai *et al.*, 2023; Herrero & Stuckey, 2015). Bioaugmentasi yang ditambahkan berupa bakteri *Bacillus proteolyticus* yang merupakan bakteri *indigenous* yang telah diisolasi dari sampel *red mud* di Tayan, Kalimantan Barat. Bakteri dalam genus *Bacillus* mampu menghasilkan spora sebagai mekanisme bertahan hidup dalam lingkungan yang ekstrem (Fan *et al.*, 2023), selain itu bakteri ini mampu menghasilkan *Extracellular Polymeric Substance* (EPS) yang dapat mengikat logam kationik pada tingkat spesifitas dan afinitas tertentu (Wróbel *et al.*, 2023). Penambahan kedua substansi ini diharapkan dapat membantu proses *phytomining* oleh tanaman *D. fragrans* dapat berjalan lebih efektif. Diharapkan dengan adanya penggunaan tanaman hiperakumulator yang tepat disertai penambahan substansi pendukung berupa pupuk kandang dan bioaugmentasi, proses *phytomining* logam Cr, V dan Sc yang ada pada *red mud* dapat berjalan lebih optimal sehingga menghasilkan *bio-ore* yang memiliki nilai ekonomi yang tinggi.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Pengumpulan dan Pengambilan Sampel

Sampel *red mud* diperoleh dari PT Indonesia Chemical Alumina, Kabupaten Sanggau, Kalimantan Barat, Indonesia dengan titik koordinat sampling -0.067937, 110.142199. *Red mud* yang dikumpulkan berumur tidak lebih dari lima tahun, lalu dianginkan selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air di dalamnya. Sampel *red mud* diayak menggunakan ayakan berukuran 10 mesh (2.00 mm) untuk memastikan ukurannya sama. Jenis pupuk kandang yang digunakan berasal dari merek "Daun Mas", dengan komposisi dari kotoran sapi. Pupuk kandang ini dikondisikan sama halnya seperti *red mud* sebelumnya. Sampel *red mud* yang masih segar diambil secukupnya untuk proses isolasi bakteri *indigenous* dari *red mud*. Proses isolasi ini meliputi isolasi, purifikasi, serta pembacaan 16s rRNA untuk mengetahui spesies bakteri secara tepat (López-Aladid *et al.*, 2023; Panigrahi & Panigrahi, 2023).

2.2 Uji *Total Plate Count* dan *Optical Density* bakteri

Uji *Total Plate Count* (TPC) dilakukan untuk mengecek jumlah koloni bakteri yang ada dalam media tanam di reaktor uji mengacu pada Brugger *et al.* (2012). Pengujian bakteri dilanjutkan dengan *optical density* (OD) dengan panjang gelombang yang digunakan adalah 610 nm dengan larutan blanko berupa akuades (Wang *et al.*, 2024).

2.3 Pengujian *Phytomining*

Pengujian ini menggunakan tanaman *D. fragrans* yang dikondisikan dalam reaktor pot dengan diameter 16 cm dan tinggi 10 cm. Seluruh reaktor berisikan media tanam dengan komposisi 90% *red mud* dan 10% pupuk kandang. Tanaman *D. fragrans* telah diberikan perlakuan aklimatisasi selama 7 hari sebelum dikondisikan dalam reaktor uji. Penelitian utama dilakukan dengan durasi selama 28 hari dengan pengambilan sampel di hari ke-0, ke-14 dan ke-28. Proses pemanenan tanaman bertujuan untuk mengukur logam berat total di akar dan batang, serta pada proses pemanenan tanaman disertai dengan pengambilan sampel media tanam untuk diuji logam yang *bioavailable.*

2.4 Metode Ekstraksi Logam

Analisis kandungan logam pada sampel dilakukan dengan menggunakan metode *Ion Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES). Persiapan proses ekstraksi logam dilakukan dengan destruksi asam yang mengacu pada SNI 8910:2021 (Rosita *et al.*, 2022). Untuk mengukur bioavailabilitas logam pada media tanam dilakukan dengan $EDTANa_2$ (Titah *et al.*, 2016) dan *aqua regia* (Rosita *et al.,* 2022), sedangkan untuk persiapan sampel tanaman mengacu pada metode *accelerated wet digestion* (Plank, 1992). Setelah analisis kandungan logam berat dilakukan, perhitungan nilai *Translocation Factor* (TF) dan *Bioconcentration Factor* (BCF) digunakna untuk mengevaluasi kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat dan kemampuan translokasi logam dari bagian akar menuju batang dan daun. Berikut persamaan yang mengacu pada Zhang *et al.* (2021).

$$TF = \frac{Kandungan\ logam\ di\ jaringan\ batang}{Kandungan\ logam\ di\ jaringan\ akar} \quad (1)$$

$$BCF = \frac{Kandungan\ logam\ di\ jaringan\ tumbuhan}{Kandungan\ logam\ di\ tanah} \quad (2)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Laju Pertumbuhan Bakteri

Pengujian TPC pada bakteri bertujuan untuk memastikan jumlah koloni bakteri yang ada dalam reaktor pada awal dan akhir perlakuan. Pengujian ini menggunakan metode *spread plate* dengan media *tryptic soy agar* (TSA) yang universal untuk semua jenis bakteri. Berikut Tabel 1 menunjukkan data TPC dari bakteri *B. proteolyticus* yang ada dalam media tanam.

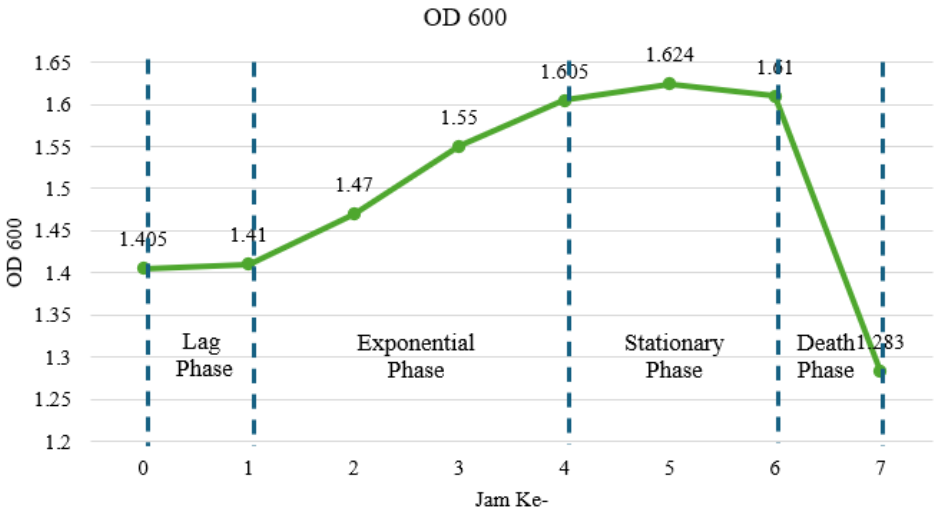
Tabel 1. Hasil TPC hari ke-0 dan ke-28

Pengujian TPC										
Perlakuan	Sampel	Pengulangan	Hari ke-0				Hari ke-28			
			Faktor Pengenceran				Faktor Pengenceran			
			10^{-1}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-1}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}
Tanpa penambahan bakteri	*D. fragrans*	1	135	4	2	3	*	14	16	15
		2	4	2	7	1	*	18	13	12
	Kontrol	1	6	1	0	2	*	31	19	13
		2	1	1	1	5	*	7	11	17
Penambahan bakteri	*D. fragrans*	1	*	3	3	1	*	54	13	15
		2	*	2	0	0	*	10	9	19
	Kontrol	1	*	2	0	1	*	18	11	14
		2	*	1	0	0	*	33	12	43*

Ket : *Perhitungan kosong apabila jumlah koloni lebih dari 300 atau terdapat *spreader*
Spreader : pertumbuhan berlebih dan tidak spesifik sehingga menutupi permukaan media

Dalam proses TPC hanya cawan petri dengan jumlah koloni di antara 30-300 dan tidak terdapat *spreader* yang dapat digunakan untuk menghitung koloni bakteri *(Amaliah et al*., 2018; Anas *et al.*, 2020). Pada hasil TPC terdapat beberapa hasil yang tidak memenuhi persyaratan, ditandai dengan jumlah koloni kurang dari 30, lebih dari 300 atau muncul *spreader*. Adanya penambahan jumlah koloni bakteri pada reaktor *D. fragrans* dengan penambahan bakteri. Pada tingkat pengenceran 10^{-3} yang mulanya tidak memenuhi untuk TPC jumlah koloninya meningkat menjadi 54.000 $^{CFU}/_{ml}$. Hal ini mengindikasikan adanya aktivitas pertumbuhan bakteri selama proses pengujian. Sama halnya terjadi pada reaktor kontrol dengan adanya penambahan bakteri. Aktivitas pertumbuhan bakteri ini dimungkinkan oleh kemampuan bakteri dalam memanfaatkan makro dan mikro nutrien yang ada dalam reaktor. Selain itu, terdapat beberapa pengaruh lain seperti pH, suhu, dan temperatur yang dapat mempengaruhi pertumbuhan bakteri. Pada beberapa pengenceran nilai TPC tidak memenuhi atau menurun dari sebelumnya sangat mungkin terjadi akibat adanya pengaruh lingkungan maupun kemampuan individu bakteri untuk bertahan hidup.

Hasil pengujian OD bakteri *B. proteolyticus* ditampilkan pada grafik yang ada di Gambar 1. Grafik tersebut menunjukkan fase-fase pertumbuhan bakteri, meliputi fase lag, fase eksponensial, fase stasioner, dan fase kematian.

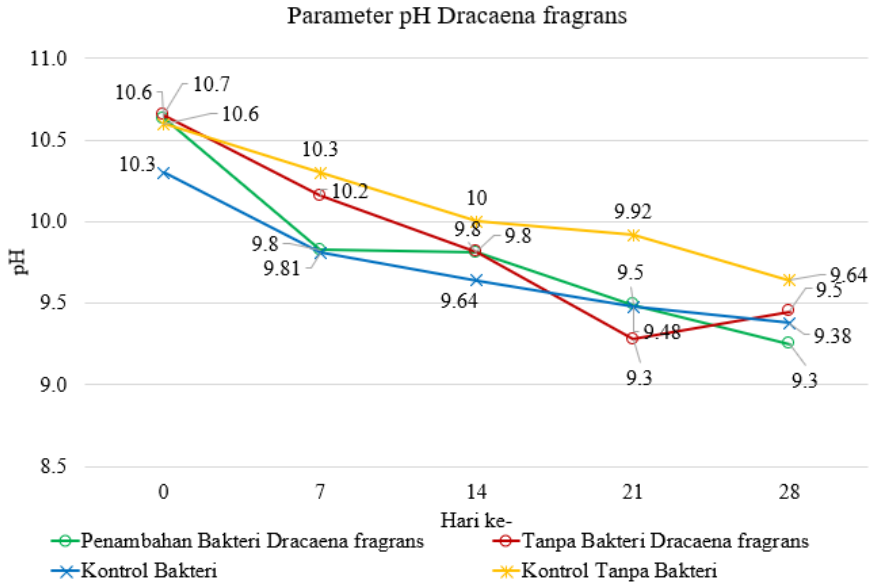


Gambar 1. Grafik pertumbuhan B. Proteolyticus

Grafik yang ada pada Gambar 1. menunjukkan fase lag *B. proteolyticus* diawali pada jam ke-0 sampai jam ke-1 dengan rentang nilai absorbansi 1,405 dan 1,41. Fase eksponensialnya berada di jam ke-1 hingga jam ke-4. Fase stasioner ini ditandai dengan nilai absorbansi yang konstan dan fase kematian ditandai dengan penurunan nilai absorbansi. Grafik ini diperlukan untuk penentuan penambahan *B. proteolyticus* sebagai bioaugmentasi pada media tanam di penelitian utama. Grafik ini digunakan dengan tujuan agar aktivitas bakteri dalam menghasilkan metabolit sekunder yang dapat membantu proses bioremediasi logam pada tanah berada dalam kondisi yang optimum. Salah satunya adalah *extracellular polymeric substance* (EPS) yang mampu mengikat logam kationik dengan afinitas tertentu (Wróbel *et al.*, 2023). Senyawa tersebut dapat membantu proses *phytomining* dalam proses penyerapan logam di bagian jaringan tanaman.

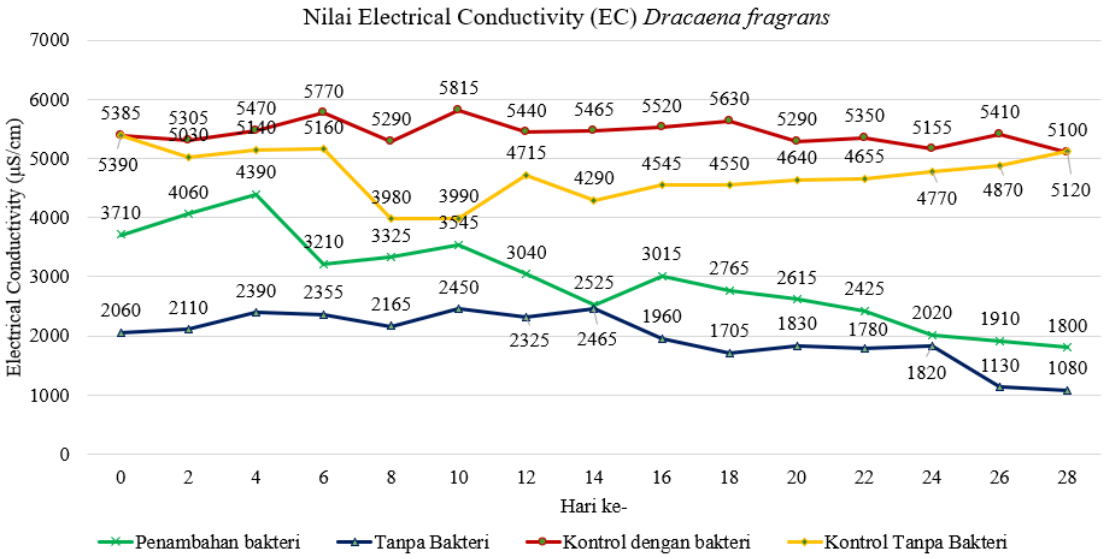
3.2 Parameter Pendukung

Parameter pendukung ini meliputi pH, EC dan berat basah dan kering tanaman uji. Nilai pH sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman maupun mikroba yang ada di tanah. Faktor ini amat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, meliputi aktivitas mikroba maupun kemampuan tanaman dalam mengeluarkan eksudat dari akarnya. Gambar 2. menunjukkan grafik perubahan pH dari media dari reaktor dalam durasi pengamatan penelitian utama. Penurunan pH ini dipengaruhi oleh banyak aspek, salah satunya adalah penyesuaian tanaman yang mengeluarkan eksudat melalui akarnya dalam rangka penyesuaian dengan lingkungan. Eksudat juga berperan dalam proses perbanyakan mikroba tanah, hal ini telah dilaporkan oleh Wood *et al*. (2002). Semakin tingginya aktivitas mikroba tanah, maka akan semakin tinggi pula metabolit sekunder seperti EPS yang akan dihasilkan. Hal ini mengakibatkan adanya penurunan pH pada tanah akibat produksi metabolit sekunder yang tinggi oleh mikroba tanah khususnya bakteri *B. Proteolyticus.*



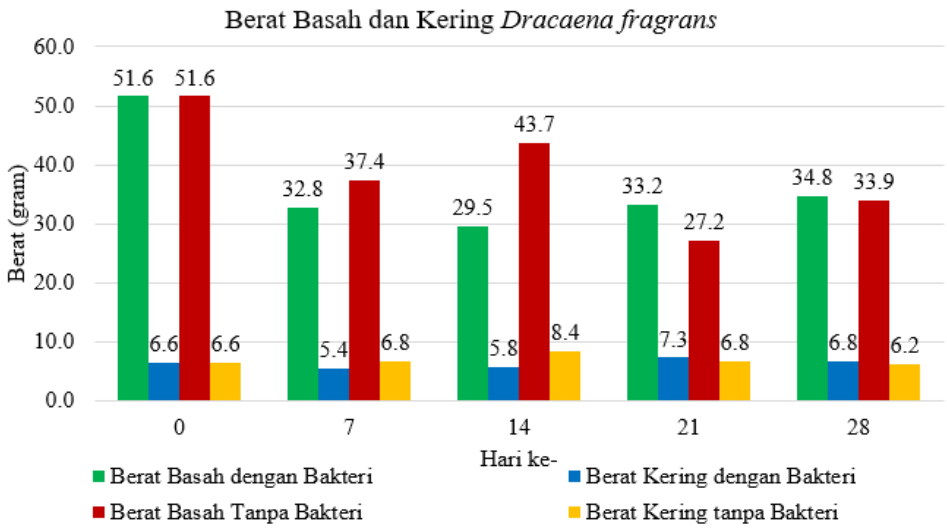
Gambar 2. Grafik perubahan pH pada media tanam *D. Fragrans*

EC atau *electrical conductivity* berhubungan dengan kemampuan tanah dalam mengkonduksikan listrik akibat kandungan logam atau ion bebas yang ada di tanah (Fu *et al.*, 2021). Nilai EC pada reaktor uji ditunjukkan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik nilai EC pada reaktor uji

Berat basah dan kering menjadi salah satu parameter untuk mengindikasikan adanya masalah fisiologis pada tanaman. Masalah fisiologis ini bisa saja disebabkan oleh cekaman lingkungan yang kritis atau partikel yang terserap bersifat toksik. Berikut pada Gambar 4 menunjukkan perubahan berat basah dan kering pada tanaman *D. fragrans*.



Gambar 4. Grafik berat kering dan basah *D. Fragrans*

Adanya cekaman lingkungan yang kritis mengakibatkan pertumbuhan tanaman menjadi melambat, yang mana tanaman beradaptasi agar dapat bertahan hidup dibandingkan dengan meningkatkan biomassanya. Cekaman ini mengakibatkan stres pada tanaman, berakibat dengan melambatnya pertambahan biomassa tanaman (Baranyi *et al.*, 2023). Selain itu, adanya akumulasi logam yang diserap oleh tanaman mengakibatkan gangguan fisiologis pada jaringan (Zhu *et al.*, 2021).

3.3 Ekstraksi Logam Kroimum (Cr) dan Vanadium (V)

Berikut pada Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan nilai *translocation factor* (TF) dan *bioconcentration factor* (BCF) dari tanaman *D. fragrans*.

Tabel 2. Hasil perhitungan nilai TF dan BCF

Jenis logam	Hari	Perlakuan	TF	BCF
Cr	7	Dengan Bakteri	8,74	0,15
		Tanpa Bakteri	3,59	0,40
	14	Dengan Bakteri	5,55	0,55
		Tanpa Bakteri	7,21	0,37
	21	Dengan Bakteri	3,86	0,73
		Tanpa Bakteri	3,77	0,39
	28	Dengan Bakteri	2,37	1,08
		Tanpa Bakteri	2,55	0,88
V	7	Dengan Bakteri	0,94	0,20
		Tanpa Bakteri	0,96	0,18
	14	Dengan Bakteri	0,96	0,41
		Tanpa Bakteri	0,98	0,09
	21	Dengan Bakteri	0,25	0,41
		Tanpa Bakteri	0,24	0,41
	28	Dengan Bakteri	0,18	2,37
		Tanpa Bakteri	0,47	1,50

Jenis logam	Hari	Perlakuan	TF	BCF
Sc	7	Dengan Bakteri	0,21	0,53
		Tanpa Bakteri	0,73	0,17
	14	Dengan Bakteri	0,56	1,15
		Tanpa Bakteri	0,52	0,67
	21	Dengan Bakteri	34,13	0,03
		Tanpa Bakteri	0,63	0,29
	28	Dengan Bakteri	0,27	0,96
		Tanpa Bakteri	0,05	4,15

Nilai TF tertinggi terdapat pada hari ke-7, yang mana pH dari media tanam masih bersifat alkalinitas tinggi. Logam Cr memiliki availabilitas yang cukup tinggi dalam kondisi pH basa dalam bentuk CrO_4^{2-} (Shahid *et al*., 2017). Adanya penurunan nilai TF Cr ini juga menandakan adanya masalah pada fisiologis tanaman. Masalah fisiologis ini menyebabkan fungsi jaringan di tanaman menjadi menurun. Jika dibandingkan nilai TF dari logam Cr dan V, terlihat perbedaan yang cukup signifikan. Nilai TF untuk logam V cenderung rendah secara keseluruhan, hal ini mengindikasikan kemampuan translokasi V dari jaringan akar (*lower part*) ke batang atau daun (*upper part*) tidak efisien. Selain itu, hal ini juga berkaitan dengan unsur V yang lebih *bioavailable* dalam kondisi lingkungan yang netral mendekati asam (Wnuk, 2023). Nilai TF pada logam Sc kurang lebih sama dengan pada logam V, akan tetapi pada hari ke 21 dengan perlakuan dengan bakteri terdapat lonjakan yang sangat tinggi hingga mencapai angka 34,13, yang mana sangat jauh dibandingkan dengan hari ke 7 dan 14. Meski demikian, lonjakan tersebut menurun pada hari ke 28, dengan angka TF 0,27. Peristiwa ini bisa diartikan sebagai respons sementara tanaman pada perubahan lingkungan yang menyebabkan translokasi logam tinggi secara mendadak di hari ke 21, diikuti dengan mekanisme proteksi yang ditandai denagn kelelahan fisiologis sehingga nilai TF kembali turun di hari ke-28.

Berdasarkan Tabel 2, nilai BCF dari hampir semua reaktor mengalami kenaikan seiring waktu. Selain itu, pada reaktor dengan penambahan bakteri menunjukkan akumulasi logam Cr yang lebih tinggi dalam jaringan tanaman. Sama halnya dengan logam V, yang mana akumulasinya cukup tinggi di bagian jaringan akar ditandai dengan nilai TF yang kecil dan nilai BCF yang tinggi. nilai BCF dari logam Sc menunjukkan adanya penambahan bakteri meningkatkan prsees translokasi logam dari akar menuju jaringan tumbuhan lainnya. Peristiwa ini ditandai dengan nilai TF yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai BCF. Hal ini mengindikasikan adanya aktivitas mikroba tanah, khususnya *B. proteolyticus* mampu meningkatkan efisiensi proses *uptake* logam Cr, V, dan Sc dalam proses *phytomining*. Peningkatan ini dipengaruhi oleh aktivitas mikroba tanah yang menghasilkan EPS, senyawa yang mampu mengkelat ion logam dalam jangkauan afinitas tertentu atau membuatnya menjadi presipitat *(Wróbel et al.*, 2023).

Nilai BCF tertinggi pada unsur Sc terdapat di hari ke-28 dengan perlakuan tanpa bakteri. Meski demikan, nilai TF dari reaktor ini hanya senilai 0.05, yang mengindikasikan hanya sebagian kecil logam Sc yang ditranslokasikan ke bagian *upper*. Reaktor dengan penambahan bakteri menunjukkan kenaikan TF yang ekstrem pada hari ke 21, akan tetapi nilai BCF terbilang rendah. Hal ini mengindikasikan kemampuan transpor yang tinggi tetapi akumulasi logam di tanaman rendah. Penambahan *B. proteolyticus* menunjukkan hasil pada nilai BCF di hari ke-14 dan ke-28, yang mana berefek pada peningkatan penyerapan logam Sc dari media ke tanaman secara umum.

Penambahan bakteri pada reaktor dapat membantu meningkatkan *availability* logam Sc dengan mengubah pH media menjadi lebih asam dengan produksi EPS yang dilakukannya (Wróbel *et al*., 2023).

4. CONCLUSION

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan *B. proteolyticus* memiliki fase stasionernya berada di jam ke-4 hingga ke-6, sehingga dapat dijadikan acuan dalam pemanfaatan *B. proteolyticus* sebagai bioaugmentasi tambahan dalam proses *phytomining*. Faktor pendukung berupa pH, EC serta berat basah dan kering tanaman dapat menjadi indikator dari kondisi tanaman *D. fragrans* yang diujikan. Penurunan pH yang terjadi pada media tanam diakibatkan oleh akitivitas mikroba tanah dan produksi eksudat oleh akar *D. fragrans*. Di sisi lain, penurunan EC mengindikasikan adanya penyerapan unsur ion bebas oleh tanaman maupun mikroba tanah untuk dijadikan sumber mikronutrien. Berat basah dan kering menjadi salah satu indikator stress pada tanaman, yang ditandai dengan adanya penurunan biomassa tanaman. Perlakuan penambahan bakteri menunjukkan nilai TF dan BCF yang lebih tinggi dibanding tanpa penambahan bakteri. Nilai TF logam Cr tertinggi terjadi di hari ke-7 dengan nilai TF mencapai 8,74, serta menurun seiring berjalannya waktu hingga pada hari ke-28 menjadi 2,37. Sedangkan, pada logam V nilai TF tergolong rendah karena nilainya <1, akan tetapi nilai BCF di hari ke-28 meningkat menjadi 2,37. Yang mana hal ini mengindikasikan *D. fragrans* mengakumulasikan logam V paling banyak di jaringan akar. Untuk logam Sc, nilai TF tertinggi ada pada hari ke 21 dengan perlakuan penambahan bakteri, yaitu 34.13. Meski demikian, terjadi penurunan drastis pada hari ke-28. Secara keseluruhan, tanaman *D. fragrans* lebih banyak mengakumulasikan logam Sc pada jaringan batang dan daun dibandingkan dengan jaringan akar.

REFERENCES

Amaliah, N. R., Basarang, M., Amran, P., & Rahmawati. (2018). Gambaran Pertumbuhan Escherichia coli Pada Media Alternatif Ubi Jalar Putih (Ipomoea batatas) Dengan Penambahan Kaldu Daging DAGING. *Jurnal Medika : Media Ilmiah Analisis Kesehatan*, *8*(1), 3–8.

Anas, B., Natasha, S. P., Dwi, P., & Marlis, N. (2020). The Comparation Study of Pasteurized “Fruits Up” Products Using TPC (Total Plate Count) Method. *Agroindustrial Journal*, *6*(1), 384.

Bai, F., Liu, S., Ma, J., & Zhang, Y. (2023). Biodegradation of sulfate and elimination of heavy metals by immobilized-microbial bioaugmentation coupled with anaerobic membrane bioreactor. *Chemical Engineering Journal*, *473*(July), 145196.

Baranyi, V., Jin, X., Dal Corso, J., Shi, Z., Grasby, S. E., & Kemp, D. B. (2023). Collapse of terrestrial ecosystems linked to heavy metal poisoning during the Toarcian oceanic anoxic event. *Geology*, *51*(7), 652–656.

Brugger, S. D., Baumberger, C., Jost, M., Jenni, W., Brugger, U., & Mühlemann, K. (2012). Automated counting of bacterial colony forming units on agar plates. *PLoS ONE*, *7*(3), 1–6.

Chen, W., Ding, Y., Li, B., Zhao, M., Li, C., & Jiao, Y. (2022). Pyrolysis characteristics and stage division of red mud waste from the alumina refining process for cyclic utilization. *Fuel*, *326*(March), 125063.

Dang, P., & Li, C. (2022). A mini-review of phytomining. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(12), 12825–12838.

Fan, L., Zhang, Y., Ismail, B. B., Muhammad, A. I., Li, G., & Liu, D. (2023). Bacillus spore germination: mechanisms, identification, and antibacterial strategies. *Critical Reviews in Food Science and*

Nutrition, *64*(30), 11146–11160.

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*.

Fu, Y., Horton, R., Ren, T., & Heitman, J. L. (2021). A general form of Archie's model for estimating bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, *597*(February), 126160.

Herrero, M., & Stuckey, D. C. (2015). Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, *140*, 119–128.

Keller, V., Stopic, S., Xakalashe, B., Ma, Y., Ndlovu, S., Mwewa, B., Simate, G. S., & Friedrich, B. (2020). Effectiveness of Fly Ash and Red Mud as Strategies for Sustainable Acid Mine Drainage Management. *Minerals*, *10*(707), 1–21.

Le, Q. H., Tran, D. D., Chen, Y. C., Nguyen, A. H., & Nguyen, L. H. (2021). A combination of dracaena fragrans and trichoderma fungus in removing heavy metals contamination from agricultural soils. *Key Engineering Materials*, *873 KEM*(October), 19–24.

López-Aladid, R., Fernández-Barat, L., Alcaraz-Serrano, V., Bueno-Freire, L., Vázquez, N., Pastor-Ibáñez, R., Palomeque, A., Oscanoa, P., & Torres, A. (2023). Determining the most accurate 16S rRNA hypervariable region for taxonomic identification from respiratory samples. *Scientific Reports*, *13*(1), 1–10.

Mishra, T., & Pandey, V. C. (2019). Phytoremediation of Red Mud Deposits Through Natural Succession. In *Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation* (pp. 409–424). Elsevier Inc.

Panigrahi, S., & Panigrahi, D. P. (2023). Characterization of a pigmented Brevundimonas sp. isolated from red mud pond samples of a bauxite mine. *Journal of Environmental Biology*, *35*(November), 359–366.

Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun, Pub. L. No. 18, 1 (1999).

Plank, C. O. (1992). Plant Analysis Reference Procedure For The Southern Region of The United States. In *Plant Analysis Reference Procedures for the Southern region of the United States* (Vol. 368).

Purwadi, I., Erskine, P. D., Hutahaean, B. P., Wijaya, T. R., Nurtjahya, E., & van der Ent, A. (2024). Rare earth elements (REEs) in soils and plants of Bangka Island (Indonesia) focussing on (hyper)accumulation. *Plant and Soil*, *507*(1), 417–431.

Qi, Y., Zhou, P., Wang, J., Ma, Y., Wu, J., & Su, C. (2022). Groundwater Pollution Model and Diffusion Law in Ordovician Limestone Aquifer owe to Abandoned Red Mud Tailing Pit. *Water (Switzerland)*, *14*(9).

Rosita, T., Ningrum, D. A. P., Yanti, Y., & Zaekhan. (2022). Validasi Metode Penetapan Kadar Logam Kadmium (Cd) dalam Sampel Tanah Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)-Nyala. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, *8*(3), 326–335.

Rossalina, W., Zaharah, T. ., & 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.

Salman, A. D., Juzsakova, T., Rédey, Á., Le, P. C., Nguyen, X. C., Domokos, E., Abdullah, T. A., Vagvolgyi, V., Chang, S. W., & Nguyen, D. D. (2021). Enhancing the Recovery of Rare Earth Elements from Red Mud. *Chemical Engineering and Technology*, *44*(10), 1768–1774.

Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., Dumat, C., & Rashid, M. I. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*, *178*, 513–533.

Swain, B., Akcil, A., & Lee, J. chun. (2022). Red mud valorization an industrial waste circular economy challenge; review over processes and their chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *52*(4), 520–570.

Titah, H. S., Tangahu, B. V., & Mangkoedihardjo, S. (2016). *Praktik Remediasi Lingkungan*. ITSPress.

Wang, J., Wang, Z., Cui, L., Zhang, M., Huo, X., & Guo, M. (2024). Visible-Near Infrared Independent Modulation of Hexagonal WO 3 Induced by Ionic Insertion Sequence and Cavity Characteristics. *Advanced Materials*, *36*(45).

Wnuk, E. (2023). Mobility, Bioavailability, and Toxicity of Vanadium Regulated by Physicochemical and Biological Properties of the Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(1), 1386–1396.

Wood, R. A., Orwell, R. L., Tarran, J., Torpy, F., & Burchett, M. (2002). Potted-plant/growth media interactions and capacities for removal of volatiles from indoor air. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *77*(1), 120–129.

Wróbel, M., Śliwakowski, W., Kowalczyk, P., Kramkowski, K., & Dobrzyński, J. (2023). Bioremediation of Heavy Metals by the Genus Bacillus. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(6).

Zhang, W., Pan, X., Zhao, Q., & Zhao, T. (2021). Plant growth, antioxidative enzyme, and cadmium tolerance responses to cadmium stress in Canna orchioides. *Horticultural Plant Journal*, *7*(3), 256–266.

Zhu, T., Li, L., Duan, Q., Liu, X., & Chen, M. (2021). Progress in our understanding of plant responses to the stress of heavy metal cadmium. *Plant Signaling and Behavior*, *16*(1).

This journal is © Marsono, et al. 2026