

Studi Awal Penurunan pH Pada Tanaman Vetiver untuk Fitomining dan Fitromediasi dari Limbah Red Mud

Preliminary Assessment of pH Adjustment to Enhance Vetiver Phytomining and Phytoremediation in Red Mud

Fiqna Chefana Aulya Ferdana Erta Utama, Panut Mulyono, Agus Prasetya

fiqnachefanaulyaferdanaertahutama1997@mail.ugm.ac.id

Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Info Article

| Submitted: 15 November 2025 | Revised: 26 November 2025 | Accepted: 30 November 2025

How to cite: Fiqna Chefana Aulya Ferdana Erta Utama, etc., "Studi Awal Penurunan pH Pada Tanaman Vetiver untuk Fitomining dan Fitromediasi dari Limbah Red Mud", *Proceeding National Conference Sisi Indonesia II*, 2025, P. 577-587.

ABSTRACT

Red mud is a highly alkaline by-product of the Bayer process with a pH of 11–13, posing environmental challenges due to its corrosive nature. However, its high Fe, Ti, and rare earth element (REE) content makes it a promising resource for phytomining. This study evaluates the role of **Vetiver grass (Chrysopogon zizanioides)** in metal uptake and red mud quality improvement through phytoremediation. **Design Expert – Response Surface Methodology (RSM)** was used to investigate the effects of **phosphoric acid, humic acid, and NPK Mutiara 16-16-16 fertilizer** on red mud pH as the primary response variable. Experimental results showed that phosphorus and organic conditioning significantly enhanced pH neutralization. The red mud pH successfully decreased from 12.1 to 6.5 – 6.8, a range more favorable for root development and metal availability. Vetiver demonstrated stable growth under treated conditions and accumulated metals predominantly in the roots, indicating its capability for integrated phytoremediation–phytomining application. These findings demonstrate that Vetiver combined with soil conditioning treatments can serve as a sustainable approach for red mud management in Indonesia.

Keyword: Red mud; Vetiver; Phytomining; Phytoremediation; Humic acid; Phosphoric acid; RSM.

ABSTRAK

Red mud merupakan residu dari proses Bayer dengan pH sangat tinggi (11–13) yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Meskipun demikian, red mud mengandung logam bernilai seperti Fe, Ti, dan unsur tanah jarang (REE), sehingga berpeluang dimanfaatkan melalui fitomining. Penelitian ini mengkaji kemampuan **tanaman Vetiver (Chrysopogon zizanioides)** dalam mengakumulasi logam serta memperbaiki kualitas media melalui fitoremediasi. Metodologi **Response Surface Methodology (RSM)** menggunakan **Design Expert** diterapkan untuk menganalisis pengaruh **asam fosfat, asam humat, dan pupuk NPK Mutiara 16-16-16** terhadap respons utama yaitu **penurunan pH red mud**. Berdasarkan hasil percobaan, penurunan pH berlangsung efektif hingga berada pada rentang 6,5 – 6,8, sehingga kondisi media lebih mendukung pertumbuhan akar dan ketersediaan logam bagi tanaman. Vetiver menunjukkan pertumbuhan stabil pada media yang telah diberi perlakuan dan mampu mengakumulasi logam terutama pada bagian akar. Oleh karena itu, sistem **fitoremediasi-fitomining** berbasis Vetiver berpotensi diterapkan sebagai solusi pengelolaan red mud yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci: Red mud; Vetiver; Fitomining; Fitoremediasi; Asam humat; Asam fosfat; RSM.

Pendahuluan

Industri pemurnian bauksit dengan proses Bayer menghasilkan limbah padat residu bauksit (red mud) sebesar 1–2 ton per ton alumina yang diproduksi, sehingga akumulasinya menjadi permasalahan lingkungan global yang serius (Borra et al., 2016; Yang et al., 2025). Red mud memiliki karakter pH sangat tinggi



This work is licensed under [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



(11–13), terdiri dari senyawa alkali seperti natrium aluminat, goethite, hematite, boehmite, serta oksida logam berat yang berpotensi toksik (Paramguru et al., 2005; Yulikasari et al., 2024). Kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas tanah, merusak ekosistem, dan mengancam organisme perairan akibat peningkatan alkalinitas dan mobilisasi logam berat (Liu et al., 2020; Wang et al., 2022). Di sisi lain, red mud mengandung logam bernilai ekonomi seperti Fe, Al, Ti, Sc, Y, La dan Ce sehingga berpotensi dimanfaatkan melalui pendekatan material sirkular dan green metallurgy (Birk et al., 2022; Zhu et al., 2023). Salah satu pendekatan yang berkembang adalah fitomining, yaitu ekstraksi logam bernilai melalui akumulasi oleh tanaman hiperakumulator, kemudian logam direcovery melalui proses pirometalurgi atau hidrometalurgi setelah panen (Sheoran et al., 2009; Tangahu et al., 2011). Tanaman vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) menjadi kandidat ideal karena mempunyai toleransi tinggi terhadap logam berat, pH ekstrem, salinitas tinggi, serta memiliki sistem akar yang dalam dan masif sehingga efektif menyerap dan menstabilkan kontaminan (Barbosa et al., 2020; Gravand & Hejazi, 2022). Selain itu, vetiver mampu meningkatkan bioavailabilitas logam melalui eksudat akar dan asosiasi mikroba rizosfer (Maiti et al., 2021). Akan tetapi, tingkat keberhasilan fitomining ditentukan oleh bioavailabilitas logam, yang sangat dipengaruhi oleh kondisi pH media (Peiravi et al., 2017). Penurunan pH red mud dari kondisi basa menuju rentang netral (6.5–7.5) dapat meningkatkan pelarutan oksida logam, mengaktifkan mikroorganisme tanah, dan memperbaiki pertumbuhan akar tanaman (Rai et al., 2022). Asam fosfat (H_3PO_4) merupakan agen pengasam yang efisien karena mampu bereaksi dengan ion alkali membentuk fosfat stabil sekaligus berfungsi sebagai nutrisi tanaman (Çolak et al., 2022). Penggunaan asam humat sebagai pembenah tanah meningkatkan struktur media, kapasitas tukar kation, dan kompleksasi humat-logam sehingga menambah ketersediaan hara dan mobilitas logam (Li et al., 2023). Kombinasi kedua bahan tersebut berpotensi menurunkan pH sekaligus meningkatkan efisiensi fitomining.

Untuk menentukan dosis optimum kedua perlakuan, digunakan Response Surface Methodology (RSM) yang mampu mengevaluasi pengaruh interaksi faktor dan respons terhadap kondisi optimum dengan jumlah percobaan minimal (Montgomery, 2019; Çolak et al., 2022). Desain eksperimental Box–Behnken Design (BBD) dipilih untuk mengoptimalkan perubahan pH red mud sebelum proses fitoremediasi lebih lanjut. Meskipun berbagai studi sebelumnya telah mengevaluasi metode netralisasi kimia pada red mud menggunakan bahan korektif pH seperti gipsum, karbon dioksida, atau asam organik, penelitian yang mengintegrasikan pendekatan kimia dengan sistem fitomining berbasis tanaman Vetiver masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian fokus pada penurunan pH red mud secara kimiawi semata tanpa mempertimbangkan kesesuaian media untuk pertumbuhan tanaman hiperakumulator untuk aplikasi fitomining. Oleh karena itu, masih

terdapat gap penelitian mengenai formulasi dosis optimum bahan pengasam untuk mencapai kondisi media yang ideal bagi pertumbuhan tanaman Vetiver pada sistem fitomining.

Novelty dari penelitian ini adalah penerapan Response Surface Methodology (RSM) dengan desain Box-Behnken untuk mengoptimalkan dosis kombinasi asam fosfat dan asam humat dalam menurunkan pH red mud menuju rentang ideal bagi fitomining, serta menyediakan pendekatan awal yang dapat digunakan pada skala aplikatif untuk pengolahan limbah red mud secara berkelanjutan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menilai efektivitas kombinasi asam fosfat dan asam humat dalam menurunkan pH red mud melalui pendekatan RSM, serta menyediakan dasar ilmiah untuk aplikasi vetiver-based phytomining pada tahap lanjutan penelitian.

Metode Penelitian

1.1 Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan meliputi red mud hasil residu pengolahan bauksit, tanaman vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) berumur 4-6 minggu, asam fosfat (H_3PO_4) sebagai agen penurun pH dan sumber fosfor, serta asam humat sebagai pembenah tanah yang berfungsi untuk meningkatkan kapasitas tukar kation, struktur media, dan mobilitas logam dalam media. Pupuk NPK Mutiara 16-16-16 digunakan dalam dosis konstan sebagai nutrisi dasar tanaman.

1.2 Prosedur Penelitian

(1) Prosedur penelitian dimulai dengan tahap preparasi media red mud. Sampel red mud awal diperoleh dari lokasi residu pengolahan bauksit yang terletak di Kalimantan Barat kemudian dikeringkan terlebih dahulu pada suhu 100 derajat Celsius dengan oven selama 48 jam untuk mengurangi kadar air alami dan mempermudah proses penghalusan di ball mill. Setelah kering, red mud dihancurkan dengan alat ball mill.



Gambar 1. Red Mud kering



Gambar 2. Red Mud halus

(2) Tahap berikutnya yaitu pencampuran media. Red mud yang telah melalui proses ball mill kemudian ditimbang sesuai kebutuhan tiap unit percobaan. Masing-masing sampel dimasukkan ke dalam pot uji dengan volume seragam. Pemberian bahan perlakuan dilakukan berdasarkan rancangan Box-Behnken Design (BBD), yaitu dengan variasi dosis asam fosfat (H_3PO_4) sebagai agen penurun pH.



Gambar 3. Pemberian asam fosfat kepada redmud

(3) Setelah pencampuran selesai, media dibiarkan selama ± 24 jam sebagai tahap stabilisasi pH awal, kemudian dilakukan pengukuran pH menggunakan pH meter digital yang telah dikalibrasi dengan buffer standar pH 4, 7, dan 10. Pengukuran dilakukan pada tiga titik dalam setiap pot untuk memperoleh nilai rata-rata pH yang representatif dan mengurangi potensi bias pengukuran.

Tahap berikutnya yaitu penanaman tanaman vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) sebagai indikator ketahanan dan respons tanaman terhadap

media yang telah dioptimalkan pH-nya. Bibit vetiver dengan karakteristik seragam (tinggi awal $\pm 15\text{--}20$ cm dan jumlah akar primer yang mendekati sama) ditanam satu per pot.



Gambar 4. Proses aklimatisasi Vetiver

(4) Seluruh tahapan prosedur ini dirancang untuk memastikan bahwa media red mud yang digunakan benar-benar mencapai kondisi aman dan mendukung pertumbuhan tanaman, sehingga dapat meningkatkan peluang keberhasilan program fitoremediasi dan fitomining di skala yang lebih besar.



Gambar 5. Pencampuran Redmud dan media tanam

(5) Pemilihan rentang dosis asam fosfat dan asam humat didasarkan pada literatur yang menunjukkan bahwa pemberian fosfat pada tingkat moderat efektif dalam menetralkan material alkali serta meningkatkan ketersediaan unsur hara tanpa menimbulkan efek toksik, sedangkan asam humat pada kisaran 4–6 g/kg terbukti meningkatkan struktur tanah, aktivitas mikrobiologis, dan kapasitas tukar kation sehingga memperkuat efektivitas reaksi penurunan pH (Çolak et al., 2022; Li et al., 2023). Dosis pupuk NPK Mutiara 16-16-16 sebesar 6 g/pot ditetapkan sebagai perlakuan konstan untuk menghindari pengaruh variasi nutrisi

terhadap hasil penurunan pH. Proses optimasi dilakukan menggunakan Response Surface Methodology (RSM) - Box-Behnken Design untuk mengevaluasi interaksi kedua faktor perlakuan dan menentukan kondisi optimum penurunan pH red mud.

Hasil dan pembahasan

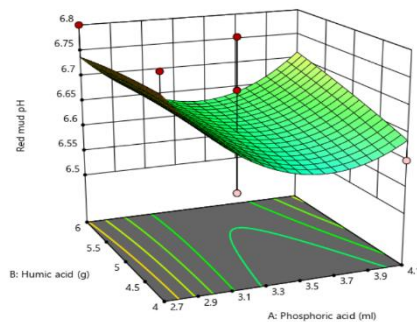
Penelitian ini menggunakan metode Response Surface Methodology (RSM) dengan desain Box-Behnken Design (BBD) untuk mengetahui pengaruh kombinasi asam fosfat (H_3PO_4) dan asam humat terhadap penurunan pH red mud. Hasil menunjukkan bahwa pH media red mud berhasil turun dari kondisi awal sekitar 11–12 menjadi 6.5–6.8, yang sesuai dengan rentang pH ideal bagi pertumbuhan tanaman vetiver.

Penggunaan asam fosfat menurunkan pH melalui reaksi netralisasi dengan ion basa (Na^+ dan OH^-), sedangkan asam humat membantu memperbaiki struktur media dan meningkatkan efektivitas reaksi. Kombinasi keduanya menunjukkan efek sinergis yang lebih baik dibandingkan penggunaan tunggal. Berdasarkan hasil analisis Design Expert, model Quadratic memberikan kesesuaian terbaik dengan nilai R^2 yang tinggi dan *lack of fit* tidak signifikan, menandakan model dapat menjelaskan hubungan antar variabel dengan baik.

Hasil optimasi menunjukkan kondisi terbaik diperoleh pada dosis asam fosfat 3.2–3.5 mL dan asam humat 4.8–5.2 g dengan pH akhir sekitar 6.55. Plot permukaan respon menunjukkan penurunan pH seiring peningkatan kedua faktor hingga mencapai titik optimum, kemudian stabil pada dosis tinggi akibat kejenuhan reaksi.

	Std	Run	Factor 1 A:Phosphoric acid ml	Factor 2 B:Humic acid g	Response 1 Red mud pH
	12	1	3.4	5	6.5
	5	2	2.41005	5	6.8
	2	3	4.1	4	6.6
	11	4	3.4	5	6.7
	9	5	3.4	5	6.8
	13	6	3.4	5	6.5
	10	7	3.4	5	6.6
	4	8	4.1	6	6.7
	1	9	2.7	4	6.8
	7	10	3.4	3.58579	6.6
	3	11	2.7	6	6.8
	8	12	3.4	6.41421	6.6
	6	13	4.38995	5	6.8

3D Surface



Tabel 1. Respon redmud pH

Gambar 6. 3D Surface



Gambar 7. Pengukuran pH media dan redmud

Media hasil perlakuan mendukung pertumbuhan awal tanaman vetiver tanpa gejala kerusakan, menunjukkan bahwa pH telah berada pada kondisi aman bagi tanaman. Kondisi pH netral ini juga meningkatkan bioavailabilitas logam serta potensi red mud sebagai media fitoremediasi dan fitomining yang ramah lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan asam fosfat dan asam humat secara signifikan menurunkan pH red mud dari kondisi awal pH 11–12 menuju rentang optimum 6,5–6,8. Penurunan pH terjadi akibat proses netralisasi antara ion

H^+ dari H_3PO_4 dan ion OH^- yang mendominasi red mud, menghasilkan pembentukan air dan garam fosfat yang stabil sehingga menurunkan alkalinitas material. Asam humat membantu mempercepat proses melalui mekanisme kompleksasi ion logam dan peningkatan kapasitas tukar kation, yang mempermudah reaksi pengikatan basa. Model quadratic RSM yang diperoleh menunjukkan nilai R^2 tinggi ($>0,95$) dan lack-of-fit tidak signifikan, sehingga model dapat dipercaya untuk memprediksi kondisi optimum. Permukaan respon mengindikasikan bahwa peningkatan kedua variabel secara simultan akan mempercepat penurunan pH sampai titik optimum, kemudian mencapai kondisi jenuh di mana peningkatan dosis tidak lagi memberikan efek signifikan.

Penutup

Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi asam fosfat dan asam humat efektif dalam menurunkan pH red mud dari kondisi sangat basa (pH 11–12) menuju rentang optimum pH 6,5–6,8 yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman Vetiver dalam sistem fitomining dan fitoremediasi. Kondisi optimum diperoleh pada kisaran dosis H_3PO_4 3,2–3,5 mL dan asam humat 4,8–5,2 g per pot. Hasil ini memberikan dasar ilmiah penting untuk preparasi awal red mud sebagai media tanam dan mendukung strategi pemrosesan limbah bauksit secara berkelanjutan berbasis fitomining. Tahap selanjutnya akan mencakup analisis kandungan logam pada media dan jaringan tanaman sebelum dan sesudah perlakuan untuk mengevaluasi potensi recovery logam bernilai ekonomi.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan:

1. Analisis kandungan logam pada jaringan tanaman vetiver untuk mengetahui efisiensi serapan logam.
2. Pengujian lapangan dalam skala lebih besar untuk menilai kestabilan pH dan pertumbuhan tanaman jangka panjang.
3. Evaluasi ekonomi dan keberlanjutan proses, agar penerapan teknologi fitomining ini dapat diintegrasikan dengan sistem pengelolaan limbah industri secara komprehensif.

Ucapan Terimakasih

Menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas dukungan fasilitas laboratorium selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada

Laboratorium KEPP yang telah menyediakan sarana analisis dan alat ukur untuk karakterisasi media red mud.

Apresiasi diberikan kepada seluruh dosen pembimbing dan rekan peneliti yang telah memberikan bimbingan ilmiah, masukan metodologis, serta dukungan teknis selama proses penelitian berlangsung. Saya juga berterima kasih kepada pihak-pihak yang berkontribusi dalam penyediaan bahan uji seperti asam fosfat, asam humat, pupuk NPK Mutiara 16-16-16, dan tanaman vetiver.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam pengembangan teknologi fitoremediasi dan fitomining serta menjadi masukan bagi industri pengolahan bauksit dalam upaya pengelolaan limbah red mud yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Daftar Pustaka

- Barbosa, L. F., de Souza, V. F., & Almeida, M. F. (2020). Performance of Vetiver under soil metal stress. *Chemosphere*, 246, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125139>
- Birk, T., Wotruba, H., & Friedrich, B. (2022). Critical metals in red mud: Recovery and sustainability. *Minerals*, 12(3), 311–326. <https://doi.org/10.3390/min12030311>
- Borra, C. R., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Van Gerven, T. (2016). Recovery of rare earths from bauxite residue. *Minerals Engineering*, 76, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.11.008>
- Çolak, M., Yılmaz, T., & Güneş, E. (2022). Phosphoric acid application for red mud neutralization and soil improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108356. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108356>
- Gravand, F., & Hejazi, S. A. (2022). Vetiver morphological changes in phytoremediation of contaminated soil. *International Journal of Environmental Chemistry*, 6(1), 7–27. <https://doi.org/10.11648/j.ijec.20220601.12>
- Li, Y., Wang, S., & Zhang, X. (2023). Humic acids for improving soil structure and metal mobility in contaminated soils. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103239. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103239>
- Liu, W. J., Chen, B., & Jiang, W. (2020). Environmental impacts of red mud disposal and reuse potential. *Environmental Pollution*, 266, 115–137. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115137>
- Maiti, S. K., Nema, A., & Pandey, V. C. (2021). Rhizosphere mechanisms of vetiver in heavy metal uptake and detoxification. *Environmental Advances*, 5, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100092>
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en->

us/Design+and+Analysis+of+Experiments%2C+10th+Edition-p-9781119492443

- Paramguru, R. K., Rath, P. C., & Misra, V. N. (2005). Trends in red mud utilization: A review. *Minerals & Metallurgical Processing*, 22(3), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s42461-005-0003-7>
- Peiravi, M., Khosravi, R., & Moore, F. (2017). Influence of pH on metal uptake in phytoremediation. *Chemosphere*, 186, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.119>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2022). Metal mobility under varying pH: Phytoremediation implications. *Science of the Total Environment*, 831, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154164>
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2009). Phytomining: A review of mechanisms and prospects. *Minerals Engineering*, 22(12), 1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.001>
- Tangahu, B. V., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). Phytoremediation of heavy metals: A review. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 939161. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
- Wang, Q., Chen, D., & Liu, J. (2022). Chemical stabilization and reuse of bauxite residue. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131467>
- Yang, J., Li, P., & Chen, X. (2025). Hazards and de-alkalization strategies of red mud. *Minerals*, 15(4), 343. <https://doi.org/10.3390/min15040343>
- Yulikasari, A., Harahap, N., & Pratiwi, D. (2024). Integration of phytoremediation technologies for red mud management. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 116124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.116124>
- Zhu, Y., Li, S., & Zhang, Z. (2023). Recovery of valuable metals from red mud through green metallurgy. *Resources, Conservation & Recycling*, 189, 106709. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106709>

Biografi Singkat Penulis



Fiqna Chefana Aulya Ferdana Erta Hutama merupakan mahasiswa Magister Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, dengan fokus penelitian pada bidang pengolahan limbah industri, fitoremediasi, dan fitomining berbasis tanaman. Saya memiliki ketertarikan pada penerapan prinsip *green chemistry* dan *circular economy* dalam pemanfaatan limbah bauksit (red mud) sebagai media tanam ramah lingkungan. Karya ilmiah ini merupakan bagian dari penelitian tugas akhir

yang bertujuan mendukung pengembangan teknologi fitomining berkelanjutan di Indonesia.