

PEMUNGUTAN UNSUR BERTHARGA PADA LIMBAH PERTAMBANGAN BAUKSIT DENGAN METODE ACID LEACHING PADA BERBAGAI LARUTAN ASAM

Damayanti Kusuma Dewi¹, Desy Noviyanti², Arif Hidayat³

^{1,2} Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia
Jl. Mauksum, Desa Ngimbang Kecamatan Palang Kabupaten Tuban, Jawa Timur

³Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang Km 14,5, Ngaglik, Umbulmartani, Sleman, Yogyakarta
Email: 22521100@students.uii.ac.id

Abstrak

Red mud, yang merupakan residu utama dari proses Bayer dalam pengolahan bauksit, masih mengandung sejumlah oksida logam berharga seperti Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , dan TiO_2 . Karakteristik ini menjadikan red mud potensial sebagai sumber sekunder logam, meskipun selama ini lebih banyak diperlakukan sebagai limbah berbahaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai jenis pelarut asam kuat, yaitu HCl , H_2SO_4 , dan HBr , dalam proses leaching konvensional menggunakan labu ukur 2 dengan penutup kondensor spiral magnetik, guna mengetahui kondisi operasi optimum serta kecenderungan selektivitas pelarutan terhadap unsur-unsur utama. Metode yang digunakan adalah leaching dengan konsentrasi asam 0.5 M untuk larutan HCl dan H_2SO_4 waktu 6 jam dan konsentrasi 4.41 M waktu 4 jam pada larutan HBr kondisi refluks diikuti analisis residu padat menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis pelarut memberikan pengaruh signifikan terhadap komposisi residu red mud. Perlakuan dengan HCl memperkaya kandungan Al_2O_3 dalam residu hingga 59,23%, menunjukkan selektivitas tinggi terhadap pelarutan pengotor. Sebaliknya, H_2SO_4 menurunkan Al_2O_3 menjadi 50,44% disertai peningkatan Fe_2O_3 dan SiO_2 , sedangkan HBr menghasilkan penurunan drastis Al_2O_3 hingga 28,53% dengan pengayaan signifikan pada Fe_2O_3 dan SiO_2 . Hasil ini menegaskan bahwa pemilihan jenis pelarut menentukan arah pemanfaatan red mud: HCl lebih sesuai untuk memperkaya alumina dalam residu, sementara H_2SO_4 dan HBr lebih potensial untuk menghasilkan residu kaya oksida besi, silika, dan titania. Temuan ini memberikan kontribusi terhadap strategi pemanfaatan red mud sebagai sumber sekunder logam bernilai, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan.

Kata kunci: bauksit, leaching, pelarut asam, red mud, XRF

1. PENDAHULUAN

Red mud (RM) merupakan limbah utama dari proses Bayer dalam pengolahan bauksit menjadi alumina, dengan produksi global mencapai lebih dari 150–175 juta ton per tahun (Liu et al., 2019; Paramguru et al., 2005). Limbah ini bersifat sangat basa (pH 9–13) akibat tingginya kandungan natrium terlarut, dan mengandung logam berat seperti Al, Cr, dan Na yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola secara tepat (Wang et al., 2020; Yang et al., 2022). Meski demikian, RM juga kaya unsur hara seperti Ca, Mg, K, S, dan Si, serta mikronutrien Zn, B, dan Mo sehingga dapat dimanfaatkan sebagai amandemen tanah dalam kondisi terkendali (Ribeiro et al., 2020; Fauziah et al., 2025). Kandungan oksida logam seperti hematite (Fe_2O_3), boehmite ($\gamma-AlO(OH)$), gibbsite ($Al(OH)_3$), dan cancrinite juga memberikan kemampuan RM dalam menstabilkan logam berat melalui mekanisme pengikatan kuat dan adsorpsi, sehingga mengurangi bioavailabilitasnya di lingkungan (Gräfe et al., 2011; Singh et al., 2022).

Bauksit sebagai bahan baku proses Bayer memiliki komposisi umum sekitar 35% Al_2O_3 , 5% SiO_2 , 6% Fe_2O_3 , dan 3% TiO_2 (Khoerunisa et al., 2025; Soleimani et al., 2018). Variasi komposisi mineralogi bauksit serta kondisi operasi proses Bayer menyebabkan karakteristik RM berbeda secara signifikan antar lokasi produksi (Power et al., 2017; Klauber et al., 2011). Berbagai penelitian telah mengeksplorasi potensi pemanfaatan RM, mulai dari perbaikan tanah, pemulihan logam, produksi baja, material katalitik, adsorben berbiaya rendah, hingga bahan bangunan seperti keramik, pigmen, dan agregat terak (Karimi & Kelishami, 2023; Rivera et al., 2017; Liu et al., 2021). Di antara berbagai

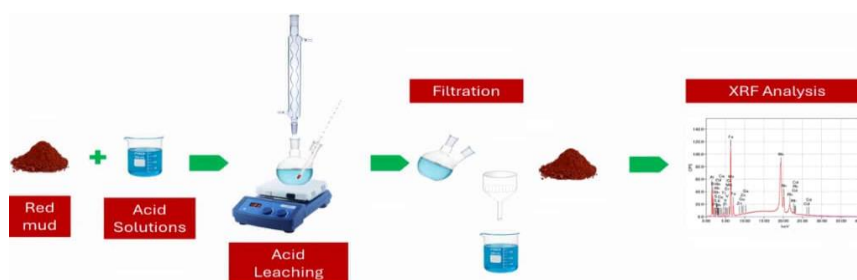
metode peningkatan nilai tambah tersebut, pelindian asam menonjol karena kemampuannya melarutkan komponen selektif secara terkendali (Zhou et al., 2019; Alkan et al., 2017). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa HCl cenderung lebih selektif terhadap pelarutan alumina, sedangkan H₂SO₄ lebih efektif melarutkan oksida besi dan silika, menghasilkan residu dengan mineralogi berbeda (Zhang et al., 2020; Alkan et al., 2017). Variasi selektivitas pelarutan sangat dipengaruhi oleh jenis pelarut, konsentrasi asam, suhu, dan waktu reaksi (Rai et al., 2012; Xue et al., 2019). Namun demikian, *state of the art* penelitian menunjukkan bahwa kajian komprehensif mengenai perbandingan efektivitas beberapa pelarut kuat—khususnya dari sisi kondisi operasi optimum dan kecenderungan selektivitas pelarutan unsur utama RM—masih belum konsisten dan belum terstandarisasi (Sutar et al., 2014; Evans, 2016). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas beberapa pelarut asam kuat, menentukan kondisi operasi optimum, serta mengidentifikasi pola selektivitas pelarutan terhadap unsur-unsur utama dalam red mud.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan di Laboratorium Penelitian Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Alat-alat yang digunakan meliputi peralatan gelas, kertas saring, *autoclave*, timbangan digital, oven, furnace, ayakan, dan alat instrumen yaitu *X-Ray Fluorescence*. Bahan-bahan yang digunakan antara lain lumpur merah (*red mud*), asam klorida (HCL), asam hidrobromida (HBr), asam sulfat (H₂SO₄), dan aquades.

2.1. Persiapan Bahan Baku

Red mud dikeringkan di bawah sinar matahari, kemudian diayak menggunakan ayakan 200 mesh agar diperoleh ukuran partikel seragam. Sampel ayakan ditimbang dan disimpan dalam wadah tertutup guna mencegah kontaminasi dan penyerapan kelembapan udara



Gambar 1. Prosedur Penelitian

2.2. Leaching

Proses pelindian dilakukan untuk menilai efektivitas tiga pelarut asam kuat: HCl dan H₂SO₄ (konsentrasi 0,5 M) serta HBr (4,41 M). Sebanyak 30 g red mud dicampurkan dengan 150 mL larutan HCl 0,5 M dan H₂SO₄ 0,5 M, sedangkan pada perlakuan HBr digunakan 1,25 g red mud dengan 50 mL larutan 4,41 M. Proses berlangsung dalam labu leher dua berpendingin kondensor dengan pengadukan konstan. Waktu reaksi adalah 6 jam untuk HCl dan H₂SO₄, serta 4 jam untuk HBr, masing-masing pada kondisi refluks. Seluruh parameter dijaga tetap sehingga perbedaan hasil hanya berasal dari jenis pelarut.

Table 1. Variasi pelarut untuk proses leaching red mud

Jenis Pelarut	Konsentrasi (M)	Volume Larutan (mL)	Massa RM (g)
HCl	0,5	150	30
HBr	4,41	50	1.25
H ₂ SO ₄	0,5	150	30

2.3. Penyaringan dan Pengeringan

Setelah leaching selesai, campuran padat–cair disaring untuk memisahkan filtrat dan residu. Residu kemudian dicuci dengan aquades hingga pH mendekati 5 untuk menetralkan sisa asam. Padatan hasil penyaringan dikeringkan pada suhu 110 °C selama 6 jam, dilanjutkan pengeringan lanjutan pada 60 °C selama 24 jam untuk memastikan sampel kering dan stabil.

2.4. Pengujian Sampel dengan *X-ray Fluorescence* (XRF)

Analisis dilakukan untuk menentukan kandungan unsur utama seperti Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , dan TiO_2 pada setiap variasi pelarut. Metode XRF dipilih karena bersifat non-destruktif dan mampu memberikan hasil kuantitatif terhadap komposisi unsur.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Variasi Pelarut pada *Leaching* terhadap Komposisi Unsur Berharga *Red mud*

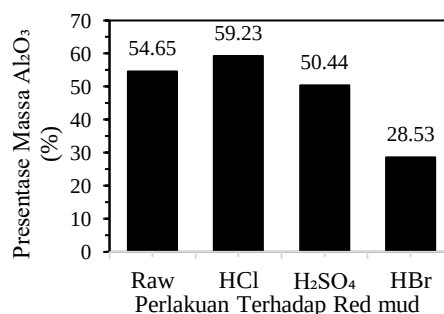
Pengujian sampel padatan hasil *leaching* dengan variasi pelarut HCl, H_2SO_4 , dan HBr pada konsentrasi dan kondisi operasional yang sama dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Tabel 2 menyajikan hasil analisis XRF dalam bentuk persentase massa, yang membandingkan sampel awal (*raw*) dengan sampel hasil perlakuan menggunakan ketiga jenis pelarut asam. Penyajian data ini memberikan gambaran awal mengenai pola perubahan kandungan unsur akibat perbedaan jenis pelarut, sebelum dilakukan analisis lebih mendalam pada subbab berikutnya.

Berdasarkan data pada Tabel 2, dapat diamati bahwa hasil karakterisasi XRF menunjukkan adanya variasi kandungan unsur utama *red mud* setelah dilakukan proses *leaching* dengan pelarut HCl, H_2SO_4 , dan HBr. Perbedaan persentase massa Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , dan TiO_2 pada masing-masing perlakuan menggambarkan bahwa jenis pelarut memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi unsur yang tertinggal dalam padatan. Secara umum, nilai kandungan Fe_2O_3 mengalami penurunan dibandingkan sampel awal, yang mengindikasikan adanya pelarutan sebagian senyawa besi ke dalam larutan. Sementara itu, Al_2O_3 dan SiO_2 menunjukkan pola yang berbeda bergantung pada jenis pelarut yang digunakan, sehingga dapat menjadi indikator efektivitas masing-masing larutan asam dalam melarutkan komponen tertentu.

Table 2. Hasil Uji XRF *red mud* pada berbagai variasi pelarut *leaching*

Sampel	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)
Raw	54,6531	94,961	15,8099	14,955
HCl	59,2341	10,4608	17,0458	16,924
H_2SO_4	50,4394	15,4344	18,9491	19,560
HBr	28,5330	19,514	20,0880	22,890

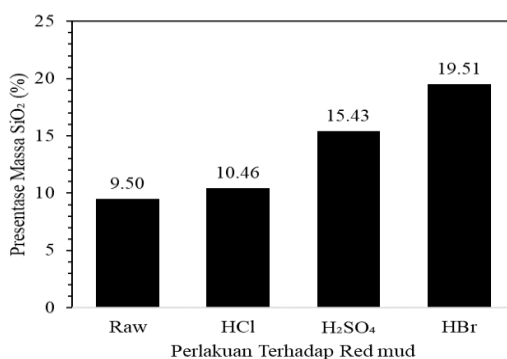
3.2. Pengaruh Variasi Pelarut pada *Leaching* terhadap Komposisi Al_2O_3 pada *Red mud*



Gambar 2. Perbandingan Al_2O_3 pada Red mud terhadap Variasi Pelarut Leaching

Berdasarkan Gambar 2, red mud awal mengandung Al_2O_3 sebesar 54,65%, menunjukkan potensinya sebagai sumber sekunder alumina. Setelah perlakuan *leaching* menggunakan HCl, kandungan Al_2O_3 meningkat menjadi 59,23%, yang menandakan adanya selektivitas ion Cl^- dalam melarutkan pengotor seperti Ca^{2+} dan Fe^{3+} melalui pembentukan garam terlarut, sementara Al_2O_3 tetap stabil. Hal ini disebabkan Cl^- bukan ligan kuat bagi Al^{3+} sehingga HCl efektif memperkaya residu dengan alumina. Asam klorida yang bersifat kuat dan mudah terdisosiasi juga melarutkan komponen basa seperti Na dan Ca tanpa banyak memengaruhi mineral aluminat seperti boehmite dan gibbsite. Dengan demikian, HCl berperan selektif dalam mempertahankan alumina pada fase padat, menjadikannya pelarut potensial untuk aplikasi berbasis Al_2O_3 seperti keramik dan refraktori. Sebaliknya, perlakuan menggunakan H_2SO_4 menurunkan kadar Al_2O_3 dalam residu menjadi 50,44% akibat terbentuknya kompleks terlarut seperti $[\text{Al}(\text{SO}_4)]^+$ dan $[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]^-$, yang mendorong pelarutan alumina ke fase cair. Kondisi ini menyebabkan residu menjadi lebih kaya Fe_2O_3 (18,95%) dan SiO_2 (15,43%), sedangkan TiO_2 (1,96%) tetap inert. Peningkatan relatif Fe_2O_3 ini tidak hanya disebabkan oleh kelarutan sebagian senyawa besi, tetapi terutama akibat menurunnya fraksi massa Al_2O_3 dalam residu. Ketika Al_2O_3 terlarut ke fase cair, persentase Fe_2O_3 secara otomatis meningkat karena Fe tetap berada pada fase padat, sehingga residu bergeser sifatnya menjadi lebih “ferro-silikat”. Sementara itu, perlakuan dengan HBr menghasilkan penurunan Al_2O_3 paling drastis hingga 28,53%, menunjukkan daya larut tinggi terhadap alumina akibat pembentukan kompleks stabil $[\text{AlBr}_4]^-$ antara Br^- dan Al^{3+} . Ion Br^- yang memiliki radius lebih besar dan polarizabilitas tinggi mempercepat proses pelindian alumina ke fase cair, meninggalkan residu kaya Fe_2O_3 (20,09%), SiO_2 (19,51%), dan TiO_2 (2,29%). Penurunan besar Al_2O_3 ini semakin memperkuat dominasi relatif Fe_2O_3 , karena berkurangnya alumina membuat proporsi oksida besi menjadi jauh lebih tinggi dibandingkan sampel awal maupun perlakuan asam lainnya. Secara keseluruhan, variasi jenis pelarut menunjukkan arah selektivitas yang berbeda, di mana HCl cenderung memperkaya alumina dalam residu, H_2SO_4 melarutkan sebagian alumina sambil meningkatkan Fe dan Si, sedangkan HBr mengekstrak alumina secara dominan.

3.3. Pengaruh Variasi Pelarut pada *Leaching* terhadap Komposisi SiO_2 pada Red mud

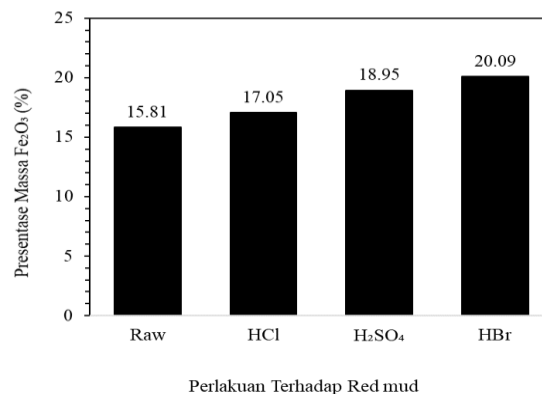


Gambar 3. Perbandingan SiO_2 pada Red mud terhadap Variasi Pelarut Leaching

Berdasarkan Gambar 3, Kandungan SiO_2 pada red mud awal sebesar 9,50% meningkat menjadi 10,46% setelah proses leaching dengan HCl. Kenaikan ini menunjukkan bahwa HCl tidak banyak melarutkan silika, melainkan melarutkan sebagian oksida logam seperti Al dan Fe, sehingga fraksi SiO_2 tampak meningkat. Perlakuan dengan H_2SO_4 menghasilkan peningkatan lebih besar hingga 15,43% karena sifat dehidrasinya yang tinggi mampu melarutkan Al_2O_3 dan Fe_2O_3 melalui pembentukan kompleks sulfat yang larut, sementara struktur silika tetap stabil. Hal ini sesuai dengan laporan Xue et al. (2019) yang menyatakan bahwa asam sulfat mempercepat pelindian logam, namun silika tetap terakumulasi dalam residu. Peningkatan paling signifikan terjadi pada HBr dengan kandungan SiO_2 mencapai 19,51%. Ion Br^- memiliki kemampuan kompleksasi tinggi dengan logam multivalen seperti Fe^{3+} dan Al^{3+} , sehingga logam lebih banyak larut dan residu menjadi semakin kaya silika. Secara keseluruhan, urutan peningkatan SiO_2 adalah $\text{HCl} < \text{H}_2\text{SO}_4 < \text{HBr}$. Residu kaya silika

ini berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku silika murni, zeolit sintetis, atau material geopolimer berbasis aluminosilikat yang bernilai ekonomi tinggi.

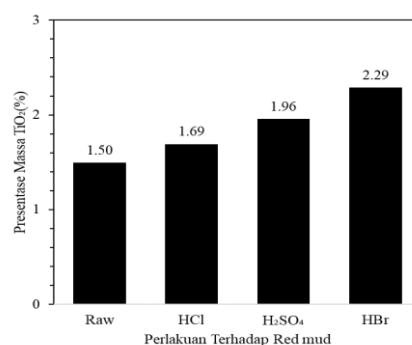
3.4. Pengaruh Variasi Pelarut pada *Leaching* terhadap Komposisi Fe_2O_3 pada *Red mud*



Gambar 4. Perbandingan Fe_2O_3 pada *Red mud* terhadap Variasi Pelarut *Leaching*

Berdasarkan Gambar 4, kandungan Fe_2O_3 pada red mud awal sebesar 15,81% meningkat menjadi 17,05% setelah leaching dengan HCl. Kenaikan ini menunjukkan bahwa HCl hanya melarutkan sebagian kecil pengotor reaktif seperti Ca dan Al, sementara fase oksida besi relatif stabil terhadap pelindian klorida. Hal ini konsisten dengan sifat Fe_2O_3 yang kurang reaktif terhadap HCl pada kondisi suhu moderat, sehingga Fe tetap terakumulasi dalam fase padat. Perlakuan menggunakan H_2SO_4 menghasilkan peningkatan lebih besar hingga 18,95%. Asam sulfat, yang memiliki kemampuan dehidrasi dan membentuk kompleks sulfat terlarut, lebih agresif melarutkan Al_2O_3 dan komponen reaktif lain dibandingkan Fe_2O_3 . Pelarutan alumina dan oksida logam lain ini memperbesar fraksi massa Fe_2O_3 dalam residu, menjadikan residu lebih kaya fase besi. Peningkatan terbesar diperoleh melalui perlakuan HBr, mencapai 20,09%. Ion Br^- memiliki polarizabilitas tinggi sehingga sangat efektif mengekstrak oksida non-besi seperti Al_2O_3 dan SiO_2 melalui pembentukan kompleks bromida stabil. Karena Fe_2O_3 relatif inert terhadap bromida pada kondisi leaching ini, fraksi Fe_2O_3 dalam residu meningkat secara signifikan akibat berkurangnya komponen lain. Secara umum, urutan kandungan Fe_2O_3 adalah $\text{Raw} < \text{HCl} < \text{H}_2\text{SO}_4 < \text{HBr}$. Pola ini menunjukkan bahwa semakin besar kemampuan pelarut mengekstrak Al dan Si, semakin tinggi tingkat pengayaan Fe dalam residu. Residu dengan kandungan Fe_2O_3 tinggi ini berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku berbasis oksida besi, seperti pigmen merah (hematite), bahan baku semen, material magnetik tingkat rendah, atau precursor geopolimer berbasis besi.

3.5. Pengaruh Variasi Pelarut pada *Leaching* terhadap Komposisi TiO_2 pada *Red mud*



Gambar 5. Perbandingan TiO_2 pada *Red mud* terhadap Variasi Pelarut *Leaching*

Perlakuan dengan HBr menghasilkan peningkatan kandungan TiO_2 paling signifikan hingga 2,29%, menunjukkan bahwa HBr sangat efektif melarutkan Al_2O_3 dan sebagian besar SiO_2 tanpa banyak melarutkan TiO_2 . Ion bromida (Br^-) memiliki kemampuan kompleksasi tinggi terhadap kation seperti Fe^{3+} dan Ca^{2+} , sehingga mampu melarutkan pengotor lebih banyak dibandingkan HCl maupun H_2SO_4 . Akibatnya, fraksi TiO_2 dalam residu meningkat secara nyata. Stabilitas TiO_2 terhadap HBr sejalan dengan sifatnya yang inert terhadap hampir semua asam kuat kecuali HF, yang dapat membentuk kompleks $[\text{TiF}_6]^{2-}$.

Berdasarkan gambar 5 yang di sajikan,, bawasanya ketahanan TiO_2 terhadap HBr pada kondisi penelitian ini memastikan akumulasinya dalam fase padatan. Secara keseluruhan, tren kandungan TiO_2 dalam residu mengikuti urutan Raw (1,50%) < HCl (1,69%) < H_2SO_4 (1,96%) < HBr (2,29%). Kecenderungan ini memperlihatkan adanya hubungan langsung antara agresivitas pelarut terhadap komponen mayor (terutama Al_2O_3 dan SiO_2) dengan akumulasi relatif TiO_2 dalam residu. Dari sisi aplikatif, peningkatan fraksi TiO_2 dalam *red mud* hasil leaching sangat penting, mengingat TiO_2 merupakan material bernilai tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai precursor keramik, pigmen putih, material fotokatalis, maupun pendukung katalis industri.

4. KESIMPULAN

Penelitian pemungutan unsur berharga dari *red mud* menggunakan pelarut HCl, H_2SO_4 , dan HBr menunjukkan bahwa jenis asam berpengaruh besar terhadap selektivitas pelindian. HCl paling selektif dalam mempertahankan Al_2O_3 hingga 59,23%, cocok untuk memperoleh residu kaya alumina. H_2SO_4 menurunkan Al_2O_3 menjadi 50,44% namun meningkatkan Fe_2O_3 , SiO_2 , dan TiO_2 , sehingga lebih sesuai untuk residu sumber oksida besi dan silika. Sementara itu, HBr menunjukkan pelindian paling kuat namun kurang selektif, menurunkan Al_2O_3 hingga 28,53% dan memperkaya oksida lainnya. Secara keseluruhan, HCl optimal untuk mempertahankan alumina, sedangkan H_2SO_4 dan HBr lebih potensial menghasilkan residu kaya oksida logam untuk industri pigmen, keramik, atau katalis.

DAFTAR PUSTAKA

- Alkan, G., Xue, S., & Kaya, M. (2017). *Leaching behaviors of red mud by different acids*. Hydrometallurgy, 169, 1–8.
- Evans, K. (2016). *The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue*. Journal of Sustainable Metallurgy, 2(4), 316–331.
- Fauziah, N., Rahmawati, I., & Prasetyo, A. (2025). *Characterization and environmental behavior of red mud for soil amendment*. Journal of Environmental Geochemistry, 14(2), 45–58.
- Gräfe, M., Power, G., & Klauber, C. (2011). *Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry*. Hydrometallurgy, 108(1–2), 60–79.
- Karimi, A., & Kelishami, H. (2023). *Recent advances in the utilization of bauxite residue*. Journal of Cleaner Production, 421, 138–147.
- Klauber, C., Gräfe, M., & Power, G. (2011). *Review of bauxite residue reuse options*. Hydrometallurgy, 108(1–2), 11–32.
- Khoerunisa, N., Sari, D., & Yusuf, R. (2025). *Mineralogical characterization of Indonesian bauxite for Bayer process optimization*. Indonesian Journal of Mining Science, 10(1), 22–31.
- Liu, W., Yang, J., & Xiao, B. (2019). *Application of bauxite residue in environmental engineering*. Environmental Science & Technology, 53(1), 1–12.
- Liu, X., Zhang, L., & Sun, Y. (2021). *Utilization of red mud as industrial raw materials: A review*. Materials Today Sustainability, 13, 100070.
- Paramguru, R. K., Rath, P. C., & Misra, V. N. (2005). *Trends in red mud utilization – A review*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 26(1), 1–29.
- Power, G., Gräfe, M., & Klauber, C. (2017). *Bauxite residue issues: I. Current management*. Hydrometallurgy, 108(1–2), 33–45.

- Rai, S., Wasewar, K. L., & Yoo, C. (2012). *Extraction of metals from red mud by acid leaching process*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 18(4), 1559–1565.
- Ribeiro, H., Silva, L., & Santos, R. (2020). *Agronomic potential of red mud as soil amendment*. Environmental Technology & Innovation, 18, 100652.
- Rivera, O., Borja, R., & Rincon, B. (2017). *Valorization of red mud for sustainable applications*. Waste Management, 61, 374–384.
- Singh, R., Mohanty, J. K., & Patel, S. (2022). *Heavy metal stabilization mechanisms in bauxite residue*. Journal of Hazardous Materials, 424, 127642.
- Soleimani, M., Shariat, M., & Charchi, A. (2018). *Mineralogy of bauxite deposits and its impact on Bayer process efficiency*. Ore Geology Reviews, 96, 173–186.
- Sutar, H., Mishra, P. V., & Sahoo, S. (2014). *Progress of red mud utilization: An overview*. American Chemical Science Journal, 4(3), 255–279.
- Wang, Y., Rao, F., & Zhang, L. (2020). *Environmental impact of red mud leakage and its management*. Journal of Environmental Management, 270, 110857.
- Xue, S., Zhu, F., & Alkan, G. (2019). *Acid leaching behavior of red mud with different mineralogical compositions*. Minerals Engineering, 131, 193–202.
- Yang, H., Li, J., & Zeng, P. (2022). *Chemical stability and leaching characteristics of bauxite residue*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(2), 107279.
- Zhang, J., Liu, J., & Chen, Q. (2020). *Comparative study of acid leaching of red mud using HCl and H₂SO₄*. Hydrometallurgy, 194, 105320.
- Zhou, X., Wang, L., & Li, H. (2019). *Selective leaching of metal oxides from bauxite residue*. Separation and Purification Technology, 215, 1–9.