

**PENINGKATAN KANDUNGAN BESI PADA LIMBAH PERTAMBANGAN
BAUKSIT (RED MUD) DENGAN METODE ACID LEACHING MENGGUNAKAN
LARUTAN ASAM FLUORIDA**

Sayyidatun Nafisah¹, Deni Shidqi Khaerudini² dan Arif Hidayat^{1*}

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia

Jl. Kaliurang km 14,5, Ngemplak, Sleman, Yogyakarta 55584

²Pusat Riset Teknologi Konversi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan, Indonesia

*Email: arif.hidayat@uji.ac.id

Abstrak

Red mud merupakan limbah padat hasil samping industri pengolahan bauksit melalui proses Bayer yang mengandung besi dalam jumlah tinggi namun bercampur dengan berbagai oksida logam. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi waktu dan konsentrasi larutan asam fluorida (HF) terhadap proses ekstraksi *red mud* (RM) menggunakan sistem refluks. RM dikeringkan, diayak hingga berukuran $<75 \mu\text{m}$, kemudian dileaching menggunakan larutan HF dengan konsentrasi 12–48% selama 1–4 jam pada kondisi refluks. Residu hasil ekstraksi dicuci, dikeringkan, dan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk menentukan perubahan komposisi unsur, khususnya kandungan besi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu dan konsentrasi larutan HF mampu memperkaya kandungan Fe_2O_3 dalam residu, dengan nilai maksimum sebesar 45,91% pada kondisi 48% HF dan waktu leaching 4 jam.

Kata kunci: asam fluorida, besi, leaching, red mud, dan X-Ray Fluorescence

Abstrak

Red mud is a solid waste by-product of the bauxite processing industry, produced by the Bayer process, and contains a high amount of iron, along with various metal oxides. This study aims to investigate the effects of leaching time and hydrofluoric acid (HF) concentration on the extraction of red mud (RM) using a reflux system. The RM was dried, sieved to $<75 \mu\text{m}$, and subsequently leached with HF solutions at 12%-48% for 1–4 hours under reflux conditions. The extraction residues were washed, dried, and characterized by X-ray fluorescence (XRF) to determine changes in elemental composition, particularly iron content. The results show that increasing both leaching time and HF concentration enhances Fe_2O_3 enrichment in the residue, with a maximum of 45.91% obtained at 48% HF concentration and 4 hours of leaching.

Kata kunci: hydrofluoric acid, iron, leaching, red mud, X-ray fluorescence

1. PENDAHULUAN

Industri pengolahan bauksit menjadi alumina melalui proses Bayer merupakan salah satu sektor penting dalam rantai pasok aluminium global. Namun, proses ini menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar yang dikenal sebagai *red mud* (RM). Setiap ton alumina yang diproduksi menghasilkan sekitar 1 hingga 1,5 ton RM, sehingga keberadaan limbah ini menjadi tantangan serius dalam aspek lingkungan dan pengelolaan sumber daya. RM merupakan residu yang mengandung berbagai oksida logam dalam jumlah signifikan. RM memiliki kandungan utama yang terdiri atas besi oksida dengan kisaran 5–60% berat, aluminium oksida 5–30% berat, serta titanium oksida 0,3–15% berat, ditambah unsur tanah

jarang dalam jumlah yang cukup berharga (Evans, 2016).

Secara global, akumulasi RM telah mencapai sekitar 4,6 miliar ton dan hanya sekitar 4% yang berhasil dimanfaatkan (Karimi & Rahbar-Kelishami, 2023). Penimbunan RM dalam skala besar menimbulkan permasalahan karena sifat kimianya yang sangat basa, ukuran partikelnya yang sangat halus yang dapat mencemari tanah maupun air. Kondisi ini mendorong penelitian untuk menemukan strategi konversi RM menjadi produk bermilai tambah. Walaupun sejumlah aplikasi telah dicoba, hingga kini belum tersedia metode yang benar-benar ekonomis untuk pemanfaatannya. Oleh karena itu, penelitian berfokus pada eksplorasi pemanfaatan RM, mulai dari bidang ameliorasi tanah (Evans, 2016), pembuatan

material bangunan (Lima dkk., 2017), pemulihan logam (Pepper dkk., 2016), adsorben (Qi dkk., 2020), katalis (Jahromi & Agblevor, 2018), keramik (Scribot dkk., 2018), bahan baku pembuatan baja, aditif terak (Karimi & Rahbar-Kelishami, 2024), pigmen (Carneiro dkk., 2018) dan zat pewarna (Rukhlyadeva dkk., 2015). Aplikasi sebagai pigmen menjadi salah satu opsi paling potensial, mengingat kandungan Fe_2O_3 yang tinggi menjadikan RM cocok sebagai bahan baku pewarna permanen. Fe_2O_3 dari RM berpotensi sebagai pigmen karena sifatnya yang stabil dan biaya rendah. Faktor-faktor tersebut, ditambah dengan meningkatnya permintaan pigmen akibat pesatnya pembangunan infrastruktur, menjadikan pemanfaatan RM semakin relevan.

RM mengandung oksida besi (Fe_2O_3) dengan kadar 30–60%, disertai Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , CaO , dan sejumlah unsur minor lainnya. Kandungan Fe_2O_3 yang tinggi memberikan peluang bagi RM untuk dimanfaatkan sebagai sumber besi sekunder yang dapat mendukung ketersediaan bahan baku industri logam, sekaligus mengurangi ketergantungan pada sumber bijih primer. Hal ini juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yakni mengubah limbah menjadi sumber daya yang bernilai (Hidayat dkk., 2020).

Ekstraksi logam dari RM umumnya dilakukan dengan pendekatan pirometalurgi maupun hidrometalurgi, namun metode pirometalurgi terkendala konsumsi energi tinggi dan limbah berbahaya. Penelitian terkini menunjukkan bahwa perlakuan hidrometalurgi menggunakan berbagai jenis asam memberikan efektivitas berbeda dalam melarutkan unsur tertentu. Secara khusus, *leaching* selektif RM banyak dilaporkan memanfaatkan asam anorganik seperti, HCl , HNO_3 , H_2SO_4 , H_3PO_4 , maupun asam oksalat (Mahinroosta dkk., 2020).

Hasil *leaching* dengan berbagai asam anorganik menunjukkan bahwa penggunaan asam sulfat maupun asam fosfat kurang efektif dalam melarutkan kalsium. Sebaliknya, asam klorida dan asam nitrat mampu secara efisien mengurangi kandungan kalsium, sehingga residu yang tertinggal kaya akan oksida besi. Data Difraksi Sinar-X (XRD) terhadap residu yang dicuci dengan asam memperlihatkan bahwa hampir semua sampel masih mengandung hematit, kecuali pada residu yang diperlakukan dengan HCl 5 N. Hal ini menegaskan bahwa hematit sulit diekstraksi

dari fase kompleks RM (Karimi & Rahbar-Kelishami, 2024). Fase dominan besi dalam RM umumnya berupa hematit (Fe_2O_3), sedangkan sebagian kecil hadir dalam bentuk goetit ($FeOOH$) (Klauber dkk., 2011). Kadar Fe_2O_3 dalam RM sangat bervariasi tergantung asal bauksit; bila melebihi 30% digolongkan sebagai RM berkadar tinggi yang layak dimanfaatkan (Li dkk., 2018) dan berpotensi sebagai sumber besi alternatif. Penggunaan asam fluorida (HF) memiliki keunggulan karena mampu melarutkan mineral silikat dan aluminat yang menjadi pengotor, sehingga residu yang tertinggal mengandung proporsi besi lebih tinggi. Penambahan HF dalam sistem *leaching* dipandang dapat meningkatkan efisiensi proses.

Optimasi parameter proses seperti variasi waktu *leaching* dan konsentrasi larutan asam penting untuk kualitas residu, efisiensi energi dan keselamatan kerja. HF konsentrasi tinggi meningkatkan kadar besi, tetapi menambah biaya dan risiko karena sifatnya korosif. Oleh karena itu, penentuan kondisi optimum dengan mempertimbangkan faktor teknis dan ekonomis menjadi tujuan penting dalam penelitian ini. Dengan demikian, penelitian peningkatan kandungan besi pada RM menggunakan metode *acid leaching* berbasis HF sangat relevan terutama dalam konteks pengelolaan limbah pertambangan bauksit dan mendukung agenda keberlanjutan industri. Dari hasil penelitian ini, RM berpotensi diubah dari limbah berbahaya menjadi sumber daya strategis bernilai ekonomi dan ramah lingkungan.

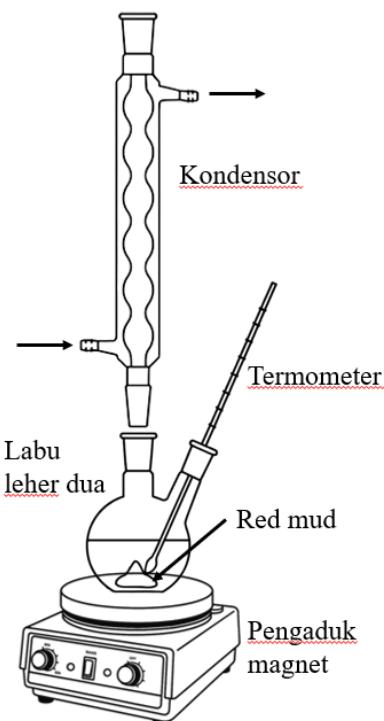
2. METODOLOGI

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi asam fluorida (HF), *red mud* (RM), dan akuades. HF merupakan asam kuat yang bersifat korosif dan sangat reaktif, sehingga berfungsi sebagai pelarut utama dalam proses *leaching* untuk melarutkan komponen-komponen pengotor seperti natrium, kalsium, alumina, dan silika dari RM. Bahan ini banyak memiliki kandungan oksida besi, dan juga mengandung sejumlah besar senyawa lain seperti Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , dan CaO yang dianggap sebagai pengotor. Akuades digunakan sebagai pelarut untuk mengencerkan larutan HF pekat hingga mencapai konsentrasi yang diinginkan serta sebagai media pencucian residu setelah proses *leaching* agar bebas dari sisa asam. Alat yang digunakan untuk ekstraksi

RM menggunakan larutan HF dapat dilihat pada Gambar 1.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh variasi waktu dan konsentrasi larutan HF terhadap proses ekstraksi RM dengan menggunakan sistem refluks. RM yang akan digunakan dikeringkan pada suhu 105 °C selama 12 jam, kemudian diayak hingga ukuran partikel lebih kecil dari 75 μm . Setelah itu, larutan HF disiapkan dengan konsentrasi berbeda, yakni 48, 24, dan 12%, dengan cara mengencerkan HF pekat menggunakan akuades. Percobaan dilakukan menggunakan labu leher tiga berkapasitas 500 mL yang dilengkapi kondensor refluks dan termometer. Sebanyak 5 g RM dimasukkan ke dalam labu bersama 100 mL larutan HF sesuai konsentrasi yang ditentukan, dengan rasio solid/liquid sebesar 50 g/L.

Labu kemudian dipasang pada *hotplate-magnetic stirrer* dan dipanaskan hingga mencapai kondisi refluks, sambil diaduk menggunakan batang pengaduk magnetik dengan kecepatan konstan sekitar 600 rpm. Proses *leaching* dijalankan dengan variasi waktu 1; 2; dan 4 jam. Setelah waktu *leaching* tercapai, sistem dipadamkan dan residu didinginkan hingga suhu sekitar 60 °C. Campuran kemudian disaring menggunakan filtrasi vakum untuk memisahkan filtrat dan residu padat. Residu padat dicuci dengan akuades hingga pH mendekati netral, kemudian dikeringkan kembali pada suhu 105 °C. Residu kering yang dihasilkan ditimbang dan selanjutnya dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi unsur, khususnya kandungan besi.



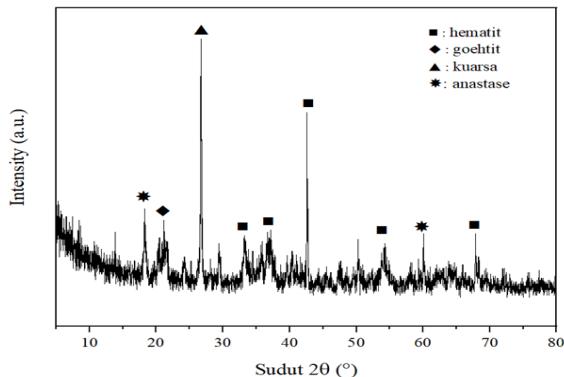
Gambar 1. Alat Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakterisasi red mud dengan XRD

Analisis mineralogi red mud (RM) dengan X-Ray Diffraction (XRD) mengungkap fase kristalin utama hasil proses Bayer. Pola difraksi menunjukkan sejumlah puncak intensitas pada sudut 2θ , antara lain 18,24°; 21,18°; 26,74°; 33,24°; 36,70°; 42,60°; 54,24°; 60,06°; dan 67,86°. Puncak dominan pada 33,24° dan 54,24° diidentifikasi sebagai hematit (Fe_2O_3), fase oksida besi utama yang memberi warna merah khas RM sekaligus sumber besi potensial. Puncak pada 21,18° menunjukkan goethit ($\text{FeO}(\text{OH})$), sedangkan 18,24° terkait dengan anatase (TiO_2) yang umum ditemukan sebagai unsur minor dalam bauksit. Puncak 26,74° menandakan kuarsa (SiO_2), sementara puncak lemah pada 13,86° menunjukkan kalsit (CaCO_3) yang terbentuk akibat penggunaan kapur pada proses pengolahan alumina.

Secara umum, pola difraksi memperlihatkan dominasi hematit dan kehadiran fase minor lainnya. Hal ini untuk memahami sifat kimia-fisika RM, karena tiap fase memengaruhi perilaku material dalam proses *leaching* maupun aplikasinya sebagai sumber besi sekunder, pigmen berbasis oksida besi, atau material konstruksi.



Gambar 2. Hasil analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) dari *red mud*.

3.2. Karakterisasi *red mud* dengan XRF

Komposisi kimia RM dan katalis dianalisis menggunakan XRF ditampilkan pada Tabel 1. Hasil karakterisasi memperlihatkan bahwa RM didominasi oleh senyawa oksida seperti besi oksida (Fe_2O_3), Aluninum oksida (Al_2O_3), Silikon dioksida (SiO_2), dan terdapat Titanium oksida (TiO_2). Beberapa oksida logam lainnya seperti Na_2O , CaO , K_2O , SO_3 , serta Cl . Setelah dilakukan proses modifikasi, kandungan oksida logam terutama Na_2O , CaO , K_2O , dan pengotor terdapat jumlah yang tidak terlalu signifikan. Adanya unsur S dan Cl yang terdeteksi dalam RM dapat direduksi setelah melalui tahap perlakuan modifikasi dan kalsinasi.

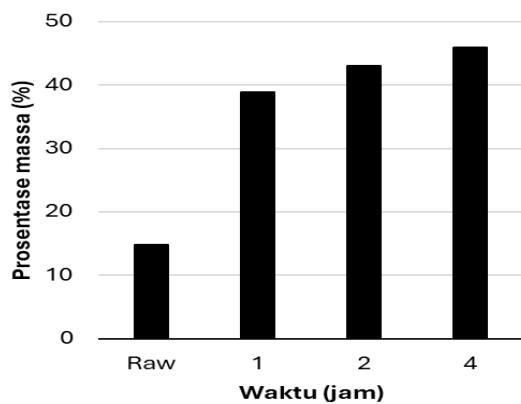
Tabel 1. Hasil Analisis XRF RM (%massa)

Komponen	% massa
Fe_2O_3	46,5
Al_2O_3	17,5
SiO_2	14,1
TiO_2	7,3
Na_2O	11,6
CaO	1,4
K_2O	0,4
SO_3	0,2
Cl	0,02

Peningkatan kandungan besi dapat dilakukan dilakukan dengan proses pelindian dan merupakan tahapan penting karena berkontribusi terhadap aktivitas katalitik material. Proses pelindian menggunakan lautan asam akan dapat melarutkan beberapa logam tertentu. Pemilihan jenis asam yang dipakai akan berpengaruh terhadap efisiensi pelindian untuk meningkatkan kadar logam tertentu dalam RM.

3.3. Pengaruh waktu terhadap kandungan besi dalam *red mud*

Hasil pengukuran kandungan unsur setelah proses *leaching* dianalisis menggunakan XRF dengan variasi waktu kontak, yang memberikan informasi kuantitatif mengenai komposisi unsur penyusun. Gambar 3 memperlihatkan perubahan persentase massa besi seiring dengan bertambahnya waktu *leaching*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu *leaching* menggunakan larutan HF berpengaruh terhadap peningkatan kandungan besi dalam residu RM. Pada kondisi awal (*raw*), kandungan besi hanya mencapai 14,82%. Setelah proses *leaching* selama 1 jam, kandungan besi meningkat menjadi 38,92%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa komponen pengotor yang lebih mudah larut, seperti natrium, kalsium, silika, dan alumina, cepat terlepas dari matriks *red mud* sehingga fraksi massa besi meningkat secara drastis.



Gambar 3. Pengaruh Waktu terhadap Kandungan Besi dalam *Red mud*.

Pada waktu *leaching* 2 jam kandungan besi sebesar 43,03%. Walaupun terjadi peningkatan, laju pertambahan lebih rendah dibandingkan jam pertama. Hal ini dapat dikaitkan dengan berkurangnya komponen pengotor yang mudah larut dan mulai munculnya keterbatasan proses difusi ion ke dalam pori partikel. Selain itu, kemungkinan terbentuknya lapisan pasif di permukaan partikel juga dapat menghambat kelarutan lebih lanjut. Pada durasi *leaching* 4 jam, kandungan besi mencapai nilai tertinggi yaitu 45,91%. Namun, tambahan waktu dari 2 jam ke 4 jam hanya memberikan kenaikan sekitar 2,88%, yang menandakan efisiensi proses mulai menurun pada tahap akhir. Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa peningkatan

waktu *leaching* memang meningkatkan konsentrasi besi dalam residu, tetapi efektivitasnya lebih dominan pada jam pertama. Penambahan waktu hingga 2 jam masih memberikan keuntungan berarti, sedangkan durasi lebih panjang hingga 4 jam hanya menghasilkan peningkatan yang relatif kecil.

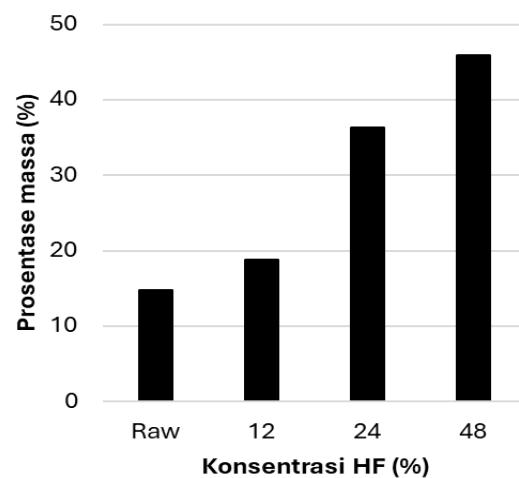
Dengan demikian, kondisi optimum dicapai pada durasi *leaching* 2 jam, karena kandungan besi yang tinggi dengan penggunaan energi dan reagen yang lebih efisien dibandingkan *leaching* selama 4 jam. Dari sudut pandang industri, hasil ini memiliki implikasi penting terkait pemilihan kondisi operasi. Efisiensi energi dan konsumsi reagen menjadi faktor utama dalam skala besar. Proses *leaching* selama 1 jam memang sudah menghasilkan peningkatan signifikan, tetapi masih dapat ditingkatkan secara optimal pada 2 jam. Setelah itu, penambahan waktu hingga 4 jam tidak sebanding dengan kenaikan kandungan besi yang diperoleh, sehingga cenderung menambah biaya energi dan konsumsi asam tanpa memberikan keuntungan berarti.

3.4. Pengaruh waktu terhadap kandungan besi dalam *red mud*

Hasil analisis variasi konsentrasi HF (Gambar 4) menunjukkan bahwa kadar besi dalam *red mud* meningkat seiring kenaikan konsentrasi asam. Pada kondisi awal, kadar besi hanya 14,82%, lalu naik menjadi 19,12% pada 12% HF akibat pelarutan awal pengotor seperti silika, alumina, kalsium, dan natrium. Peningkatan signifikan terjadi pada 24% HF dengan kadar besi 36,42%, sedangkan pada 48% HF tercapai nilai maksimum 45,91%. Tren ini menegaskan bahwa konsentrasi HF lebih tinggi mempercepat pelarutan mineral pengotor, meski peningkatan dari 24% ke 48% relatif kecil karena keterbatasan difusi dan kemungkinan terbentuknya lapisan pasif.

Dari perspektif industri, penggunaan HF konsentrasi tinggi meningkatkan kadar besi, tetapi juga mengonsumsi reagen, biaya, dan risiko keselamatan mengingat sifat HF yang sangat korosif dan toksik. Oleh karena itu, pemilihan kondisi operasi yang optimum tidak semata-mata didasarkan pada nilai akhir kadar besi, tetapi juga mempertimbangkan aspek efisiensi energi, biaya bahan kimia, serta keamanan proses. Konsentrasi menengah (~ 24%) sudah memberikan peningkatan

signifikan dengan konsumsi reagen yang relatif lebih efisien.



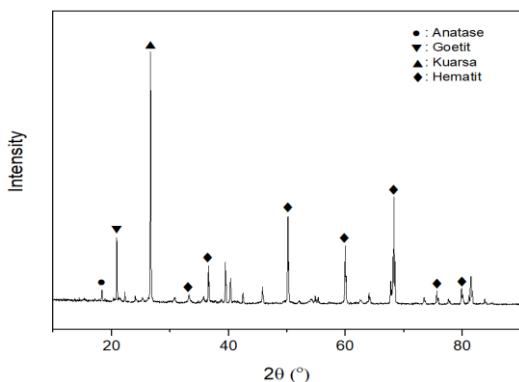
Gambar 4. Pengaruh Waktu terhadap Kandungan Besi dalam *Red mud*.

Peningkatan konsentrasi asam memperkuat proses *leaching* RM, namun efektivitas tambahan akan menurun pada konsentrasi tinggi. Penggunaan H_2SO_4 juga mampu memperkaya besi namun kurang ekonomis (Debadatta & Pramanik, 2013). Metode pelindian berbasis asam efektif untuk meningkatkan kandungan besi, tetapi membutuhkan konsumsi reagen yang besar dan pengelolaan limbah cair asam yang dihasilkan (Kong dkk., 2022). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pemilihan konsentrasi HF yang moderat dapat menjadi kompromi yang tepat untuk memperoleh efisiensi optimum dalam skala industri.

3.5. Analisis XRD dari *red mud* hasil *leaching* dengan HF

Analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fase mineral dalam RM setelah proses *leaching* menggunakan HF. Pola difraksi pada Gambar 5 menunjukkan sejumlah puncak dengan intensitas tajam, menandakan kristalinitas yang baik. Puncak dominan pada $2\theta = 26,6^\circ$ diidentifikasi sebagai kuarsa (SiO_2), menunjukkan bahwa sebagian silika masih bertahan pasca-leaching. Selain itu, puncak pada $33,2^\circ$; $35,6^\circ$; $54,1^\circ$; dan $62,5^\circ$ dikaitkan dengan hematit (Fe_2O_3), fase utama yang tetap stabil dalam kondisi asam sehingga memperkaya kandungan besi pada residu. Puncak pada $21,2^\circ$ menandakan goetit ($FeOOH$), sedangkan $18,2^\circ$ dan $27,4^\circ$

berhubungan dengan anatase dan rutil (TiO_2). Kehadiran puncak kecil pada $29,4^\circ$ menunjukkan kalsit ($CaCO_3$), yang sebagian masih tersisa meskipun kalsium relatif mudah larut. Secara umum, leaching HF lebih efektif melarutkan senyawa silikat dan aluminat dibandingkan oksida besi, sehingga residu akhir didominasi hematit dan kuarsa. Hal ini relevan untuk pemanfaatan RM sebagai sumber besi sekunder atau pigmen oksida besi.



Gambar 5. Hasil Analisis X-Ray Diffraction (XRD) dari Red mud Hasil Leaching dengan Larutan HF.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa *leaching* RM dengan HF efektif meningkatkan kadar besi melalui pelarutan selektif pengotor. Kandungan Fe_2O_3 meningkat dari 14,82% menjadi 45,91% pada kondisi 48% HF selama 4 jam. Namun, peningkatan paling signifikan terjadi pada 1–2 jam dan konsentrasi menengah (24%). Oleh karena itu, kondisi optimum yang direkomendasikan adalah 2 jam dengan konsentrasi HF moderat, karena lebih efisien dalam penggunaan energi dan reagen serta relevan untuk penerapan industri berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bento, N. I., Santos, P. S., de Souza, T. E., Oliveira, L. C., & de Castro, C. S. (2016). Composites based on PET and red mud residues as catalyst for organic removal from water. *Journal of Hazardous Materials*, 314, 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.066>
- Carneiro, J., Tobaldi, D., Capela, M., Novais, R., Seabra, M., & Labrincha, J. (2018). Synthesis of ceramic pigments from industrial wastes: Red mud and electroplating sludge. *Waste Management*, 80, 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.032>
- Debadatta, D., & Pramanik, K. (2013). A study on chemical leaching of iron from red mud using sulphuric acid. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 17(7), 50–56.
- do Prado, N. T., Heitmann, A. P., Mansur, H. S., Mansur, A. A., Oliveira, L. C., & de Castro, C. S. (2017). PET-modified red mud as catalysts for oxidative desulfurization reactions. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.01.011>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>
- Hidayat, A., Roziq, G. K., Muhammad, F., Kurniawan, W., & Hinode, H. (2020). Biodiesel synthesis from used cooking oil using red mud as heterogeneous catalyst. *Materials Science Forum*, 981, 144–149. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.991.144>
- Jahromi, H., & Agblevor, F. A. (2018). Hydrodeoxygenation of pinyon-juniper catalytic pyrolysis oil using red mud-supported nickel catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 236, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.05.008>
- Karimi, Z., & Rahbar-Kelishami, A. (2023). Efficient utilization of red mud waste via stepwise leaching to obtain α -hematite and mesoporous γ -alumina. *Scientific Reports*, 13(1), 8527. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35753-w>
- Karimi, Z., & Rahbar-Kelishami, A. (2024). The study of acid leaching on the mineralogical and microscopic changes of red mud. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(2), 1121–1133. [10.1007/s42461-024-00948-w](https://doi.org/10.1007/s42461-024-00948-w)
- Klauber, C., Gräfe, M., & Power, G. (2011). Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. *Hydrometallurgy*, 108(1–2), 11–32.

- <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.007> <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.092>
- Kong, H., Zhou, T., Yang, X., Gong, Y., Zhang, M., & Yang, H. (2022). Iron recovery technology of red mud—A review. *Energies*, 15(10), 3830. <https://doi.org/10.3390/en15103830>
- Li, B., Zhang, B., Ning, P., He, L., & Zuo, X. (2018). Present status and prospect of red mud resource utilization and safety treatment. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 37(2), 714–722. [10.16085/j.issn.1000-6613.2017-0843](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2017-0843)
- Lima, M., Thives, L., Haritonovs, V., & Bajars, K. (2017). Red mud application in construction industry: Review of benefits and possibilities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/251/1/012033>
- Mahinroosta, M., Karimi, Z., & Allahverdi, A. (2020). Recycling of red mud for value-added applications: A comprehensive review. *Applied Clay Science*, 195, 105735. [10.1016/B978-0-12-803581-8.11474-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11474-2)
- Pepper, R. A., Couperthwaite, S. J., & Millar, G. J. (2016). Comprehensive examination of acid leaching behaviour of mineral phases from red mud: Recovery of Fe, Al, Ti, and Si. *Minerals Engineering*, 99, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.012>
- Qi, X., Wang, H., Zhang, L., Xu, B., Shi, Q., & Li, F. (2020). Removal of Cr(III) from aqueous solution by using bauxite residue (red mud): Identification of active components and column tests. *Chemosphere*, 245, 125560. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125560>
- Rukhlyadeva, M., Belousov, M., Nikonenko, E., Ismagilova, G., & Kolesnikova, M. (2015). Production of black iron oxide from red mud. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 88(3), 377–381. [10.1134/S1070427215030027](https://doi.org/10.1134/S1070427215030027)
- Scribot, C., Maherzi, W., Benzerzour, M., Mamindy-Pajany, Y., & Abriak, N.-E. (2018). A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production. *Construction and Building Materials*, 163, 21–31.