

The Effect of Hydrofluoric Acid Treatment on SiO₂ and Al₂O₃ Content in Red Mud to Increase Fe₂O₃ Levels

Pengaruh Perlakuan Asam Hidroflourat Terhadap Kandungan SiO₂ Dan Al₂O₃ Dalam Red Mud Untuk Meningkatkan Kadar Fe₂O₃

Sayyidatun Nafisah^{a,*}, Arif Hidayat^a, and Deni Shidqi Khaerudini^b

^a Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

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

*Corresponding author: 22926011@students.uui.ac.id

Diterima: 20 Agustus 2025, Direvisi: 26 September 2025, Diterbitkan: 31 Desember 2025

ABSTRACT

Red mud is a waste product of the Bayer process that contains metals such as Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂. To optimize red mud as an iron source, the silica and alumina contents need to be reduced since they can decrease efficiency. This study aims to evaluate the leaching process of red mud using 100 mL of 6.5 M hydrofluoric acid (HF) with variations in red mud mass (10, 20, 25 g) and stirring time (1–6 h) to produce iron-rich residues. XRF analysis showed an increase in Fe₂O₃ content up to 44.65% in the 25 g sample after 6 h, accompanied by a decrease in Al₂O₃ and SiO₂ to 20.23% after 4 h. XRD results indicated that the dominant phases in the residue were hematite, magnetite, and goethite, while silica and alumina phases decreased. ICP-MS analysis revealed that the dissolved Al concentration reached 10.369 mg/L at 25 g (6 h), while Si reached 3609 mg/L (20 g, 1 h). The optimum condition was achieved at 25 g of red mud with 4 h of leaching, yielding residues rich in Fe₂O₃ and low in impurities. The novelty of this study lies in the use of 6.5 M HF, which selectively dissolves Si and Al without dissolving Fe, thereby producing residues with potential as raw materials for magnetite or other functional materials within the framework of a circular economy.

Keywords: red mud, hydrofluoric acid, leaching, X-ray Fluorescence and X-ray Diffraction

ABSTRAK

Red mud merupakan limbah dari proses Bayer yang mengandung logam seperti Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂ dan TiO₂. Untuk mengoptimalkan red mud sebagai sumber besi, kandungan silika dan alumina perlu dikurangi karena dapat menurunkan efisiensi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi proses leaching red mud menggunakan 100 mL asam hidrofluorat (HF) 6,5 M dengan variasi massa red mud (10, 20, 25 g) dan waktu pengadukan (1 - 6 jam) untuk menghasilkan residu kaya besi. Analisis XRF menunjukkan peningkatan kandungan Fe₂O₃ hingga 44,65% pada sampel 25 g selama 6 jam dengan penurunan Al₂O₃ dan SiO₂ turun hingga 20,23% selama 4 jam. Hasil XRD menunjukkan fasa dominan dalam residu adalah hematit, magnetit dan geotit, sementara fasa silika dan alumina menurun. Uji ICP-MS memperlihatkan konsentrasi Al larut mencapai 10,369 mg/L pada 25 g (6 jam), sedangkan Si mencapai 3609 mg/L (20 g, 1 jam). Kondisi optimum dicapai pada 25 g red mud dengan waktu 4 jam, menghasilkan residu kaya Fe₂O₃ dan rendah pengotor. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan HF 6,5 M yang selektif melarutkan Si dan Al tanpa melarutkan Fe, sehingga menghasilkan residu potensial sebagai bahan baku magnetit atau material fungsional lain dalam kerangka ekonomi sirkular.

Kata kunci: red mud, asam hidroflourat, leaching, X ray- Fluorescence dan X-ray Diffraction

PENDAHULUAN

Tailing merupakan limbah padat hasil proses pemisahan mineral berharga dari bijih, yang umumnya terdiri atas partikel halus batuan dan air, serta mengandung sisa bahan kimia seperti sianida atau merkuri (*Tailing Tambang, Gangue*, n.d.). Limbah ini termasuk dalam kategori limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) karena berpotensi mencemari lingkungan, sehingga pemanfaatannya masih terbatas (Yudha Mulia et al., 2018). Meskipun demikian, beberapa perusahaan di Indonesia telah mengupayakan pemanfaatan tailing, seperti PT. Timah Tbk untuk bahan baku pasir, PT. Aneka Tambang untuk paving block, dan PT. Freeport Indonesia sebagai campuran beton (Radar Papua, n.d.).

Di sisi lain, *red mud* merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses Bayer dalam ekstraksi alumina dari bauksit, dengan rasio produksi sekitar 1–1,5 ton *red mud* per ton alumina (Nie et al., 2023). *Red mud* mengandung logam-logam berharga seperti besi, aluminium, titanium, silika, dan unsur tanah jarang (Liu & Naidu, 2014). Namun, karena sifatnya yang sangat basa ($\text{pH} > 10$), *red mud* tergolong limbah berbahaya apabila tidak dikelola dengan baik (Liu & Naidu, 2014).

Pemanfaatan *red mud* sebagai sumber logam bernilai telah menjadi fokus

penelitian dalam upaya pengelolaan limbah industri yang lebih berkelanjutan. Karakteristik fisik *red mud* berupa lumpur berwarna merah disebabkan oleh tingginya kandungan oksida besi (Fe_2O_3) di dalamnya (Samal, 2021). Komponen utama lainnya yang terdapat dalam *red mud* antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), titanium dioksida (TiO_2), serta sejumlah kecil unsur seperti natrium, kalsium, magnesium, dan logam tanah jarang.

Komposisi kimia *red mud* sangat bervariasi tergantung pada asal bauksit dan kondisi proses Bayer. Secara umum, *red mud* mengandung sekitar 30–60% Fe_2O_3 , 10–20% Al_2O_3 , 5–20% SiO_2 , dan 2–10%

TiO_2 (Nie et al., 2023). *Red mud* juga memiliki pH tinggi, yakni berkisar antara 10–13, karena residu NaOH dari proses Bayer, yang menjadikannya limbah bersifat sangat basa dan sulit terdegradasi secara alami (Rathan Raj et al., 2019). Hal ini menyebabkan *red mud* berisiko mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.

Upaya pemanfaatan *red mud* sebagai sumber mineral berharga semakin dikembangkan seiring meningkatnya kesadaran terhadap prinsip keberlanjutan dan ekonomi sirkular (Kinnarinen et al., 2015). Beberapa metode telah diteliti, antara lain pirometalurgi, hidrometalurgi, dan metode berbasis reagen kimia untuk mengekstraksi unsur seperti Fe, Ti, dan REE (Sutar et al., 2014), (Rai et al., 2017).

Meskipun menjanjikan, tantangan seperti tingginya biaya proses, kompleksitas komposisi kimia *red mud*, dan risiko pencemaran lingkungan masih menjadi kendala utama (Borra et al., 2016), (Akcil et al., 2024).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pelindian *red mud* menggunakan berbagai asam. Zhang et al. menunjukkan bahwa asam sulfat dapat mengekstraksi besi secara efisien pada suhu tinggi (Zhang et al., 2022). Wang et al. menggunakan asam oksalat untuk melarutkan besi dan membentuk magnetit sebagai adsorben (Yang et al., 2015). Li et al menggunakan HCl untuk pelarutan Fe dengan efisiensi hingga 75% (Guo et al., 2016). Kombinasi asam juga telah diteliti, seperti oleh Chen et al. yang menunjukkan hasil *leaching* lebih baik dengan campuran asam oksalat dan sulfat (Cheng et al., 2017). Sementara itu, Oliveira et al. berhasil mensintesis hematit murni dari *red mud* melalui *leaching* dan pemanasan residu (Oliveira et al., 2015).

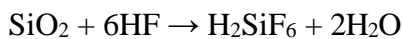
Sifat fisis dan kimia *red mud* menjadikannya bahan yang potensial untuk diolah kembali, khususnya untuk mengekstraksi kandungan besi yang tinggi. Salah satu senyawa besi yang dapat dihasilkan adalah magnetit, yaitu senyawa oksida besi yang memiliki sifat kemagnetan tinggi, tahan panas, dan tahan terhadap bahan kimia (Gostu et al., 2017), (Shoppert et al., 2022). Magnetit banyak digunakan

dalam bidang rekayasa lingkungan, biomedis, elektronik, dan adsorben (Nurhayati et al., 2021). Berbagai studi menunjukkan bahwa *red mud* hasil tambang Indonesia dapat mengandung hingga 42,48% Fe_2O_3 sebelum diekstraksi menjadi 72,44% setelah ekstraksi ligand APDC, serta dapat mengandung elemen tanah jarang dalam jumlah kecil (Wahyinto et al., 2022), (Samal et al., 2015). Dengan komposisi tersebut, *red mud* memiliki nilai tambah sebagai sumber logam strategis dan bahan baku alternatif bagi berbagai industri (Zhang et al., 2022).

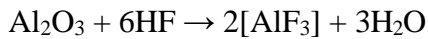
Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengekstraksi logam dari *red mud* adalah proses *leaching*, yaitu teknik hidrometalurgi yang memanfaatkan larutan asam atau basa untuk melarutkan unsur logam dari material padat (Borra et al., 2015). Proses *leaching* pada tekanan atmosfer menjadi metode yang menarik karena tidak memerlukan peralatan bertekanan tinggi dan dapat dilakukan dengan biaya operasional lebih rendah. Namun demikian, efisiensi ekstraksinya masih menjadi tantangan tersendiri.

Pemanfaatan HF sebagai pelarut selektif untuk silika dan alumina menjadi pendekatan potensial dalam memperkaya kandungan besi pada residu *red mud*. HF dapat membentuk kompleks fluoro-silikat dan fluoro-aluminat yang larut, sementara besi tetap tertahan dalam fase padat. Reaksi

leaching SiO₂ dengan HF dapat dijelaskan melalui reaksi berikut:



Sementara itu, pelarutan Al₂O₃ dalam HF mengikuti reaksi:



HF juga memiliki kemampuan selektif dalam melarutkan pengotor tanpa melarutkan senyawa besi secara signifikan, sehingga memungkinkan pemurnian dan peningkatan kadar Fe dalam residu (Davris et al., 2016). Dengan demikian, pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan konsentrat kaya besi yang lebih aman dan bernilai guna, sejalan dengan prinsip pengelolaan limbah berkelanjutan dan ekonomi sirkular.

Penggunaan HF dalam *leaching* harus dilakukan dengan hati-hati karena sifatnya yang sangat korosif dan toksik. HF dapat menyebabkan luka bakar serius dan berisiko tinggi jika terhirup atau terkena kulit. Oleh karena itu, proses ini harus dilakukan di dalam fume hood dengan penggunaan alat pelindung diri (MSDS Hydrofluoric Acid, 2011).

Untuk mengkaji perubahan komposisi *red mud* setelah proses *leaching*, digunakan teknik karakterisasi seperti Fluoresensi Sinar-X (XRF), Difraksi Sinar-X (XRD), dan Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). XRF digunakan untuk mengetahui komposisi unsur utama dalam sampel, XRD untuk

mengidentifikasi perubahan struktur kristal, dan ICP-MS untuk mengukur konsentrasi unsur-unsur terlarut dalam filtrat (Samal et al., 2015), (Kaußen & Friedrich, 2018). Dengan karakterisasi tersebut, pendekatan berbasis HF dapat dievaluasi secara komprehensif dalam menghasilkan residu yang potensial sebagai bahan baku berbasis besi seperti magnetit.

Berdasarkan kajian tersebut, pemanfaatan HF sebagai pelarut selektif untuk silika dan alumina menjadi pendekatan potensial dalam memperkaya kandungan besi pada residu *red mud*. HF dapat membentuk kompleks fluoro-silikat dan fluoro-aluminat yang larut, sementara besi tetap tertahan dalam fase padat. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan konsentrat kaya besi yang lebih aman dan bernilai guna, sejalan dengan prinsip pengelolaan limbah berkelanjutan dan ekonomi sirkular.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan meliputi *red mud*, larutan HF 55% (PT Alfa Kemika Indonesia) yang diencerkan menjadi 6,5 M, serta aqua demineralisasi (PT Brataco, Indonesia). *Red mud* diperoleh dari limbah industri pengolahan bauksit di Bangka Belitung, Indonesia, kemudian dikeringkan, digiling, dan diayak menggunakan saringan 100 mesh sebelum

digunakan. Konsentrasi HF 6,5 M dipilih karena cukup kuat untuk melarutkan SiO₂ dan Al₂O₃ secara efektif, namun tetap mempertahankan Fe₂O₃ dalam fase padat sehingga proses *leaching* berlangsung selektif dan menghasilkan residu kaya besi. Peralatan laboratorium yang digunakan meliputi grinder untuk penghalusan sampel, *sieve shaker* 100 mesh untuk penyeragaman ukuran partikel, oven pada suhu 130 °C untuk pengeringan, beaker porselen sebagai wadah reaksi, magnetic stirrer dengan batang pengaduk magnetik untuk proses pengadukan, serta corong plastik dan kertas saring Whatman No. 1 untuk filtrasi.

Instrumen karakterisasi yang digunakan adalah XRF PANalytical Epsilon3 (Malvern Panalytical, Belanda) untuk analisis komposisi unsur utama, XRD Rigaku MiniFlex 300/600 (Rigaku Corporation, Jepang) dengan parameter pemindaian 2θ sebesar 3°–90° (step size 0,02°; 40 kV; 15 mA) untuk identifikasi fasa kristalin, serta ICP-MS Agilent 7700 Series (Agilent Technologies, AS) untuk analisis konsentrasi logam dalam filtrat.

Proses Penelitian

Red mud digiling menggunakan grinder hingga halus dan diayak dengan *siev shaker* menggunakan ukuran 100 *mesh*. *Red mud* yang lolos dioven pada temperature 130°C

selama 24 jam untuk menghilangkan kadar air.

Red mud ditimbang sebanyak 10, 20 dan 25 g untuk setiap percobaan. Larutan HF 6,5 M disiapkan dengan melarutkan HF pekat menggunakan aqua DM hingga volume 100 mL. *Red mud* dan larutan HF dimasukkan ke dalam gelas beker porselen dan dicampurkan menggunakan pengaduk magnetik. Proses dilakukan di dalam *fume hood* pada temperature ruang dengan kecepatan 60 rpm. Variasi waktu pengadukan adalah 1, 2 dan 4 jam untuk seluruh variasi massa. Untuk massa 25 g dilakukan tambahan variasi waktu yaitu 5 dan 6 jam.

Hasil pengadukan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan filtrat dan residu. Filtrat disiapkan untuk uji ICP-MS. Residu *red mud* kemudian dicuci hingga pH netral untuk di oven pada temperature 130°C selama 24 jam. Sampel kemudian ditimbang untuk disiapkan uji karakterisasi XRD dan XRF.

PEMBAHASAN

Komposisi *Red Mud* dan Efektivitas *Leaching* dengan HF

Red mud merupakan limbah hasil proses pemurnian bauksit yang memiliki kandungan logam-logam oksida dalam jumlah signifikan. Hasil karakterisasi awal menggunakan XRF ditunjukkan pada Tabel

1 bahwa *red mud* yang digunakan dalam penelitian ini mengandung Fe_2O_3 sebesar 14,8%, Al_2O_3 sebesar 48,9%, dan SiO_2 sebesar 32,4%. Kandungan oksida besi bisa potensi *red mud* sebagai sumber besi alternatif, meskipun tingginya kadar silika dan alumina dapat menjadi pengotor dalam proses pemanfaatan besi.

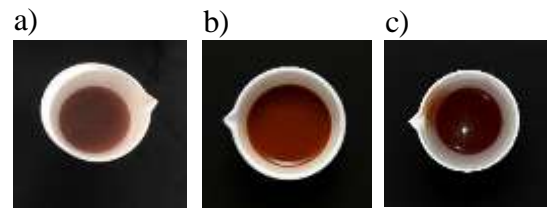
Tabel 1. Data XRF *red mud* pada penelitian

Senyawa (%)	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	CaO
Penelitian	14,8	48,9	32,4	1,63	2

Tingginya kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 menyebabkan kebutuhan akan proses yang selektif untuk menurunkan kadar kedua senyawa tersebut tanpa melarutkan besi. Oleh karena itu, pendekatan *leaching* menggunakan HF menjadi relevan untuk mengeksplorasi kemampuannya dalam melarutkan silika dan alumina secara selektif.

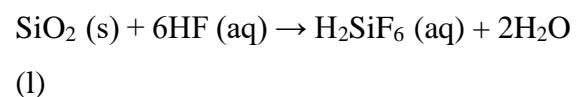
Pelarutan *red mud* menggunakan larutan HF 6,5 M dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan HF dalam melarutkan SiO_2 dan Al_2O_3 , sekaligus mempertahankan atau meningkatkan kandungan Fe_2O_3 dalam residu. Secara visual, larutan hasil pencampuran menunjukkan perubahan warna dan kejernihan yang menunjukkan terjadinya reaksi kimia. Perbedaan intensitas warna larutan pada Gambar 1 menunjukkan

peningkatan kelarutan logam dari *red mud* seiring bertambahnya massa, ditandai dengan warna larutan yang semakin pekat. Warna larutan awal berubah menjadi lebih keruh dengan adanya endapan merah kecokelatan yang mengindikasikan pembentukan fasa besi yang tidak larut.

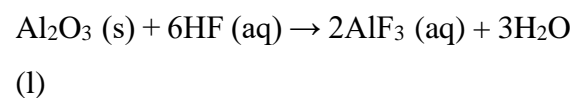


Gambar 1. Warna larutan *leaching red mud* dengan variasi massa: (a) 10 g, (b) 20 g, dan (c) 25 g

Asam HF bereaksi dengan silika membentuk senyawa kompleks heksafluorosilikat yang mudah larut dalam air, sesuai dengan reaksi berikut:



Sementara itu, alumina bereaksi membentuk senyawa aluminium fluorida larut:

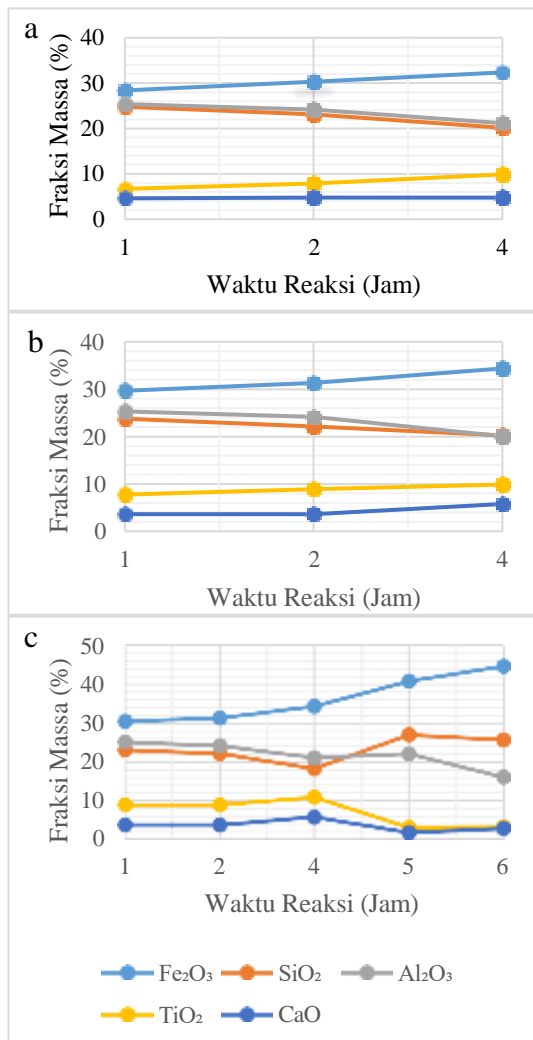


Reaksi ini mengindikasikan bahwa HF memiliki afinitas yang tinggi terhadap Si dan Al, namun relatif tidak melarutkan senyawa besi seperti Fe_2O_3 yang memiliki kestabilan lebih tinggi dalam kondisi ini.

Analisis Unsur Residu Padar (XRF)

Setelah proses *leaching*, hasil XRF menunjukkan adanya peningkatan kadar

Fe₂O₃ dalam residu padat. Pada variasi massa *red mud* 25 g dengan waktu pengadukan 6 jam, kadar Fe₂O₃ meningkat hingga 44,65%. Sebaliknya, kadar Al₂O₃ menurun dari 25,11% menjadi 15,01%, dan SiO₂ menurun dari 23,05% menjadi 20,23% pada waktu 4 jam, meskipun kemudian mengalami kenaikan kembali pada waktu 5 dan 6 jam. Tren ini dapat dilihat secara jelas pada Gambar 2.



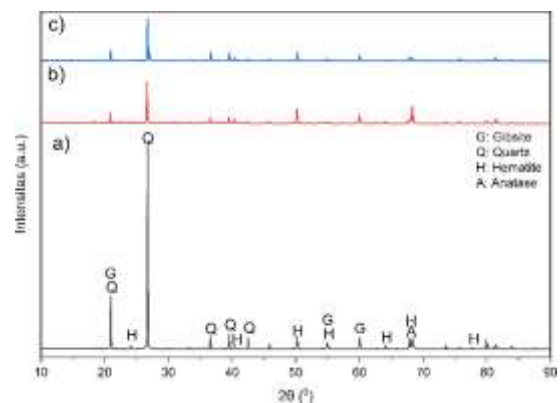
Gambar 2. Kandungan Residu berdasarkan XRF *red mud* 10 g (a), 20 g (b) dan 25 g (c) terhadap waktu reaksi

Peningkatan kadar Fe₂O₃ mengindikasikan bahwa senyawa besi tidak

larut dalam HF dan terakumulasi dalam residu. Secara kuantitatif, kadar Fe₂O₃ meningkat dari 30,44% pada sampel awal menjadi 44,65% pada residu 25 g dengan waktu 6 jam. Sebaliknya, kadar Al₂O₃ turun dari 25,11% menjadi 15,01%, sedangkan SiO₂ menurun dari 23,05% menjadi 20,23% pada 4 jam sebelum kembali meningkat pada waktu 5–6 jam. Fluktuasi ini mengindikasikan kemungkinan terjadinya reaksi balik atau presipitasi silika setelah waktu tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa waktu reaksi lebih dari 4 jam cenderung menurunkan selektivitas pelarutan terhadap silika.

Identifikasi Fasa Kristalin (XRD)

Pola XRD residu *red mud* hasil *leaching* menggunakan HF 6,5 M pada massa 25 g dengan waktu 1-4 jam ditampilkan pada **Gambar 3**. Difraktogram menunjukkan perbedaan intensitas dan keberadaan fasa kristalin yang semakin jelas seiring bertambahnya waktu reaksi.



Gambar 3. Pola XRD *red mud* 25 g setelah *leaching* menggunakan HF selama (a) 1 jam, (b) 2 jam, dan (c) 4 jam.

Analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fase mineral dalam residu *red mud* setelah proses *leaching* menggunakan HF. Pola difraksi pada Gambar 3 menunjukkan sejumlah puncak dengan intensitas tajam, menandakan kristalinitas yang baik. Puncak dominan pada $2\theta = 20,8-21,0^\circ$ dan $26,6^\circ$ diidentifikasi sebagai kuarsa (SiO_2) serta gibbsite ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$). Intensitas kuarsa terlihat tinggi pada Gambar 3a, namun menurun signifikan pada Gambar 3b dan 3c, menunjukkan berkurangnya kandungan silika dalam residu. Gibbsite hanya muncul dengan intensitas rendah pada awal reaksi, kemudian menurun pada difraktogram berikutnya.

Puncak pada 40° , $49-50^\circ$, dan $65-70^\circ$ dikaitkan dengan hematit (Fe_2O_3), yang menjadi fasa dominan dan semakin intens pada waktu reaksi 4 jam. Hal ini menunjukkan bahwa Fe_2O_3 stabil dalam kondisi asam dan terkonsentrasi dalam residu. Selain itu, puncak pada 68° menunjukkan keberadaan anatase (TiO_2), sejalan dengan adanya kandungan titanium dalam *red mud* awal. Secara keseluruhan, hasil XRD mengonfirmasi bahwa *leaching* dengan HF lebih efektif melarutkan silika dan alumina dibandingkan besi oksida, sehingga residu akhir didominasi hematit

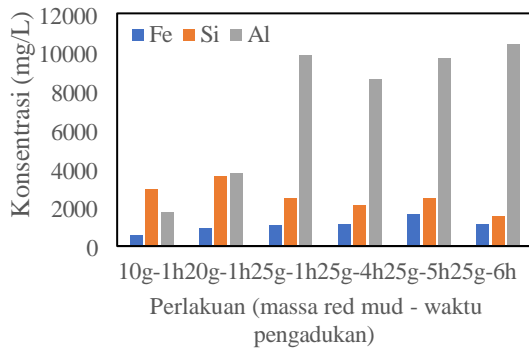
dengan sedikit kontribusi kuarsa dan anatase. Kondisi ini mendukung pemanfaatan residu sebagai sumber besi sekunder atau bahan baku material berbasis oksida besi.

Konsentrasi Unsur Terlarut (ICP-MS)

Hasil pengujian filtrat menggunakan ICP-MS menunjukkan bahwa konsentrasi unsur Al dan Si dalam larutan meningkat seiring waktu reaksi. Konsentrasi Al mencapai nilai tertinggi 10.369 mg/L pada sampel 25 g (6 jam), sedangkan Si mencapai 3.609 mg/L pada sampel 20 g (1 jam). Sebaliknya, konsentrasi Fe dalam filtrat tetap rendah, berkisar antara 535–1.607 mg/L, memperkuat dugaan bahwa besi tetap berada dalam fase padat dan tidak ikut larut.

Tabel 2. Konsentrasi Fe, Si, dan Al dalam filtrat hasil *leaching red mud* berdasarkan waktu dan massa sampel

No	Massa Red Mud (g)	Waktu Pengadukan (Jam)	Fe (mg/L)	Si (mg/L)	Al (mg/L)
1	10	1	535	2924	1738
2	20	1	895	3609	3745
3	25	1	1045	2450	9843
4	25	4	1118	2115	8573
5	25	5	1607	2460	9708
6	25	6	1123	1530	10369



Gambar 4. Grafik Konsentrasi terlarut Al, Si dan Fe terhadap variasi massa *red mud* dan waktu pengadukan

Temuan ini memperkuat hasil XRF dan XRD sebelumnya bahwa HF mampu melarutkan Si dan Al secara selektif tanpa menyebabkan hilangnya kandungan Fe dari residu. Pelarutan Si yang tinggi juga mungkin dipengaruhi oleh volatilitas senyawa seperti SiF_4 dalam sistem terbuka. Oleh karena itu, diperlukan kehati-hatian dalam mempertahankan kondisi tertutup atau penggunaan *fume hood* selama proses berlangsung.

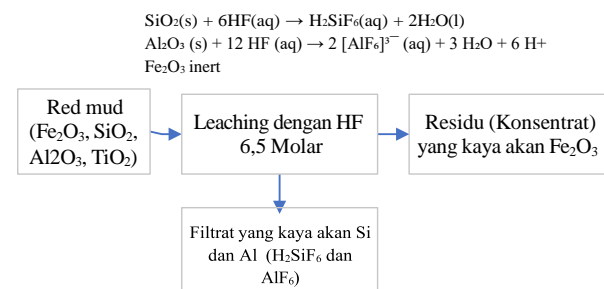
Sintesis dan Implikasi

Secara keseluruhan, kombinasi metode analitik menunjukkan bahwa perlakuan *red mud* dengan HF 6,5 M pada waktu reaksi 4 jam dan massa 25 gram menghasilkan residu yang kaya akan Fe_2O_3 (34,29%) serta memiliki kandungan pengotor SiO_2 dan Al_2O_3 yang lebih rendah (20,23% dan 21,05%). Hasil ini menunjukkan bahwa residu memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan baku sintesis magnetit atau material fungsional lainnya..

ekonomi sirkular dengan mengubah limbah padat B3 menjadi sumber daya baru yang memiliki nilai tambah. Penggunaan HF terbukti selektif dalam melarutkan silika dan alumina, dan kombinasi karakterisasi XRF, XRD, dan ICP-MS memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai

Metode ini mendukung prinsip mekanisme pemurnian *red mud* menjadi residu kaya besi. Kedepannya, pendekatan ini dapat dikembangkan lebih lanjut dalam skala yang lebih besar dan dikombinasikan dengan proses pemrosesan lanjutan untuk pemanfaatan besi dan logam lainnya dalam *red mud*.

Mekanisme selektivitas pelarutan *red mud* oleh HF ditunjukkan pada Gambar 5. Senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 bereaksi dengan HF membentuk kompleks fluoro-silikat dan fluoro-aluminat yang larut dalam filtrat, sedangkan Fe_2O_3 bersifat inert sehingga tetap tertinggal dalam fase padat. Kondisi ini menghasilkan residu kaya besi yang potensial dimanfaatkan sebagai bahan baku magnetit atau material fungsional lain.



Gambar 5. Mekanisme pemurnian *red mud* dengan HF 6,5 M menghasilkan residu kaya besi

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan red mud dengan HF 6,5 M secara selektif mampu melarutkan SiO₂ dan Al₂O₃ tanpa melarutkan Fe₂O₃ secara signifikan, sehingga meningkatkan kadar Fe₂O₃ dalam residu. Kondisi optimum diperoleh pada massa red mud 25 gram dengan waktu pengadukan 4 jam, menghasilkan residu dengan kandungan Fe₂O₃ sebesar 34,286% dan penurunan kadar SiO₂ serta Al₂O₃ masing-masing menjadi 18,23% dan 21,05%. Hasil karakterisasi XRF, XRD, dan ICP-MS secara konsisten mendukung efisiensi selektivitas HF dalam proses leaching. Residu hasil perlakuan berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku sintesis magnetit atau material berbasis besi lainnya, sehingga mendukung pengelolaan limbah red mud secara berkelanjutan dalam kerangka ekonomi sirkular.

DAFTAR PUSTAKA

- Akcil, A., Swami, K. R., Gardas, R. L., Hazrati, E., & Dembele, S. (2024). Overview on hydrometallurgical recovery of rare-earth metals from red mud. *Minerals*, *14*(6), 587. <https://doi.org/10.3390/min14060587>
- Borra, C. R., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Van Gerven, T. (2016). Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): A review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *2*(4), 365–386. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>
- Borra, C. R., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Van Gerven, T. (2015). Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Minerals Engineering*, *76*, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.005>
- Cheng, C., Li, M., Chan, C. K., Tong, H., Chen, C., Chen, D., Wu, D., Li, L., Wu, C., Cheng, P., Gao, W., Huang, Z., Li, X., Zhang, Z., Fu, Z., Bi, Y., & Zhou, Z. (2017). Mixing state of oxalic acid containing particles in the rural area of Pearl River Delta, China: Implications for the formation mechanism of oxalic acid. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *17*(15), 9519–9533. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9519-2017>
- Davris, P., Balomenos, E., Panias, D., & Paspaliaris, I. (2016). Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), using a functionalized hydrophobic ionic liquid. *Hydrometallurgy*, *164*, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.012>
- Gostu, S., Mishra, B., & Martins, G. P. (2017). Low temperature reduction of hematite in red-mud to magnetite. *Minerals, Metals and Materials Series*, 67–73. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_10
- Guo, Y., Li, F., Zhu, H., Li, G., Huang, J., & He, W. (2016). Leaching lithium from the anode electrode materials of spent lithium-ion batteries by hydrochloric acid (HCl). *Waste Management*, *51*, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.036>
- Inovasi Freeport Indonesia, Maksimalkan Potensi Pasir Sisa Tambang Untuk Manfaat Lebih Banyak - *Radar Papua*. (n.d.). Retrieved July 25, 2025, from

- <https://radarpapua.jawapos.com/lifestyle-teknologi/324014807/inovasi-freeport-indonesia-maksimalkan-potensi-pasir-sisa-tambang-untuk-manfaat-lebih-banyak>
- Kaußen, F. M., & Friedrich, B. (2018). Phase characterization and thermochemical simulation of (landfilled) bauxite residue (“red mud”) in different alkaline processes optimized for aluminum recovery. *Hydrometallurgy*, 176, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.01.006>
- Kinnarinen, T., Holliday, L., & Häkkinen, A. (2015). Dissolution of sodium, aluminum and caustic compounds from bauxite residues. *Minerals Engineering*, 79, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.007>
- Liu, Y., & Naidu, R. (2014). Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. *Waste Management*, 34(12), 2662–2673. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>
- Material Safety Data Sheet Hydrofluoric Acid*. (2011).
- Metode Pemandangan dan Pembuangan Limbah Tambang - Tailing Tambang, Gangue*. (n.d.). Retrieved July 25, 2025, from <https://eddyump.com/id/pendidikan/li-mbah-tambang-dan-metode-pembuangan>
- Nie, Z., Zhao, Q., Zhao, Q., Li, Y., Yang, D., Liu, H., Yang, S., Li, J., Tian, S., Li, C., Tie, C., Huang, J., & Ning, P. (2023). Red mud with enhanced dealkalization performance by supercritical water technology for efficient SO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, 344, 118469. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118469>
- Nurhayati, S., Shofiyani, A., Zaharah, A., Nawawi, J. H., & Barat, K. (2021). Sintesis magnetit dari limbah tambang bauksit menggunakan templat cetyltrimethylammoniumbromide. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 43(2), 143–151. <https://doi.org/10.24817/jkk.v43i2.6516>
- Oliveira, A. A. S., Costa, D. A. S., Teixeira, I. F., & Moura, F. C. C. (2015). Gold nanoparticles supported on modified red mud for biphasic oxidation of sulfur compounds: A synergistic effect. *Applied Catalysis B: Environmental*, 162, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.07.003>
- Rai, S., Wasewar, K. L., & Agnihotri, A. (2017). Treatment of alumina refinery waste (red mud) through neutralization techniques: A review. *Waste Management and Research*, 35(6), 563–580. <https://doi.org/10.1177/0734242X17696147>
- Rathan Raj, R., Brijitta, J., Ramachandran, D., & Perumal Pillai, E. B. (2019). Microstructure evolution in ordinary Portland cement–metakaolin–red mud-based ternary blended cement. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 100(4), 707–718. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00398-4>
- Samal, S. (2021). Utilization of red mud as a source for metal ions—A review. *Materials*, 14(9), 2211. <https://doi.org/10.3390/ma14092211>
- Samal, S., Ray, A. K., & Bandyopadhyay, A. (2015). Characterization and microstructure observation of sintered

- red mud-fly ash mixtures at various elevated temperature. *Journal of Cleaner Production*, 101, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.010>
- Shoppert, A., Valeev, D., Diallo, M. M., Loginova, I., Beavogui, M. C., Rakhmonov, A., Ovchenkov, Y., & Pankratov, D. (2022). High-iron bauxite residue (red mud) valorization using hydrochemical conversion of goethite to magnetite. *Materials*, 15(23), 8423. <https://doi.org/10.3390/ma15238423>
- Sutar, H., Mishra, S. C., Sahoo, S. K., Chakraverty, A. P., & Maharana, H. S. (2014). Progress of red mud utilization: An overview. *Chemical Science International Journal*, 4(3), 255–279. <https://doi.org/10.9734/ACSJ/2014/7258>
- Wahyinto, I. R., Aritonang, A. B., & Zaharah, T. A. (2022). Extraction and characterization of Fe₂O₃ from red mud PT. Indonesia Chemical Alumina West Kalimantan. *Berkala Sainstek*, 10(3), 155–161. <https://doi.org/10.19184/bst.v10i3.30252>
- Yang, Y., Wang, X., Wang, M., Wang, H., & Xian, P. (2015). Recovery of iron from red mud by selective leach with oxalic acid. *Hydrometallurgy*, 157, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.021>
- Yudha Mulia, A., Nirwana Sari, I., Litbang Perumahan dan Permukiman, P., & Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Jalan Cileunyi Wetan, B. (2018). Karakteristik limbah tailing sebagai bahan baku mortar siap pakai. *Jurnal Permukiman*, 13(1).