

PEMULIHAN UNSUR BERHARGA (TITANIUM OKSIDA/TiO₂) DARI LIMBAH PERTAMBANGAN BAUKSIT (RED MUD) MENGGUNAKAN METODE ACID LEACHING

A. R. Adi, A. Zulkania, dan A. Hidayat*

*Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia,
Yogyakarta, Indonesia*

*e-mail: arif.hidayat@uii.ac.id

Article Received on: 5th December 2024

Revised on: 30th May 2025

Accepted on: 1st July 2025

ABSTRAK

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya volume limbah red mud (RM) dari industri pengolahan bauksit yang berpotensi mencemari lingkungan. RM mengandung logam berharga seperti Titanium Oksida (TiO₂), yang dapat dimanfaatkan untuk mengurangi limbah dan mendukung ekonomi sirkular. Penelitian ini bertujuan memulihkan TiO₂ dari RM menggunakan metode acid leaching. Prosedur dimulai dengan pengeringan sampel, penghalusan, dan ekstraksi menggunakan larutan asam hidrobromida (HBr). Variasi konsentrasi asam, suhu, dan durasi ekstraksi diterapkan untuk mengidentifikasi kondisi optimal. Analisis XRF digunakan untuk mengukur komposisi kimia RM, sementara persentase pemulihan titanium dievaluasi pada berbagai parameter. Hasil menunjukkan bahwa suhu 75°C dan konsentrasi HBr 8,82 mol/L dengan waktu reaksi 2 jam menghasilkan pemulihan TiO₂ terbaik, mencapai 69,54%. Namun, durasi reaksi yang lebih lama mengurangi efisiensi karena pembentukan produk samping. Penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi ekstraksi yang terkontrol dapat meningkatkan efisiensi pemulihan logam berharga dari RM. Metode ini tidak hanya menawarkan solusi untuk mengurangi limbah, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui pemanfaatan kembali limbah pertambangan bauksit.

Kata kunci: titanium oksida, bauksit, red mud, acid leaching, asam hidrobromida

ABSTRACT

This study addresses the high volume of red mud (RM) waste generated by the bauxite processing industry, which poses significant environmental risks. RM contains valuable metals such as Titanium Dioxide (TiO₂), which can be utilized to reduce waste and support the circular economy. This research aims to recover TiO₂ from RM using the acid leaching method. The procedure begins with sample drying, grinding, and extraction using hydrobromic acid (HBr) solution. Variations in acid concentration, temperature, and extraction duration were applied to identify optimal conditions. XRF analysis was used to measure RM's chemical composition, while titanium recovery percentages were evaluated under different parameters. Results showed that a temperature of 75°C, HBr concentration of 8.82 mol/L, and a reaction time of 2 hours produced the best TiO₂ recovery, reaching 69.54%. However, longer reaction durations reduced efficiency due to the formation of by-products. This study demonstrates that controlled extraction conditions can enhance the recovery efficiency of valuable metals from RM. The method not only offers a solution for reducing waste but also provides economic benefits through the reuse of metal from tailings.

Keywords: titanium oxide, bauxite, red mud, acid leaching, hydrobromic acid

PENDAHULUAN

Penelitian yang dilakukan dilatarbelakangi adanya permasalahan besar pada Industri pengolahan bauksit dalam membuang red mud. Red mud (RM) merupakan produk limbah padat yang dihasilkan sepanjang proses produksi alumina. Diperkirakan sekitar 50-55%

dari bijih bauksit yang mengalami proses pengolahan akan berubah menjadi red mud. Saat ini, metode tumpukan kering (dry stacking) menjadi salah satu praktik paling populer untuk pembuangan red mud. Jika limbah ini tidak dikelola dengan baik, maka dapat menimbulkan dampak buruk pada lingkungan sekitarnya.

Pemanfaatan RM telah berhasil dilakukan untuk beberapa kepentingan, diantaranya sebagai flokulan, adsorben, agen perbaikan tanah, dan katalis (Shim et al., 2018; Wang et al., 2021). Untuk meminimalkan kerusakan lingkungan dari RM dan pemborosan sumber daya logam berharga, pemanfaatan RM yang berkelanjutan perlu dilakukan secara sistematis, terutama dalam mewujudkan ekonomi sirkular dan industri yang berkelanjutan (Tang et al., 2019). Kandungan berbagai oksida logam dalam red mud seperti Titanium, Vanadium, Gallium, dan logam tanah jarang berpotensi diolah untuk mendapatkan unsur berharga. Pemungutan unsur berharga dari red mud memiliki banyak manfaat, baik dari segi ekonomi maupun lingkungan. Hal ini merupakan peluang yang menarik bagi industri pertambangan dan pengolahan bauksit untuk meningkatkan keuntungan dan mencapai keberlanjutan.

Pemulihan logam berharga dari lumpur merah tidak hanya menawarkan potensi untuk mengurangi limbah industri tetapi juga menyediakan sumber daya berharga yang dapat dimanfaatkan kembali dalam berbagai aplikasi industri, mendorong prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan. Red mud (RM) adalah limbah padat curah dengan alkalinitas kuat yang dibuang selama proses ekstraksi alumina, yang juga dianggap sebagai sumber daya logam untuk mendaur ulang logam berharga dan menyiapkan material baru (Huang et al., 2016). Umumnya, setiap ton alumina yang diproduksi dapat menghasilkan 0,8 hingga 1,5 ton RM (Pan et al., 2023). Karena karakteristik alkalinitas yang tinggi, dispersi yang baik, dan luas permukaan spesifik yang besar, penyimpanan RM yang aman sangat sulit dilakukan (Shim et al., 2018). Selain itu, logam beracun (seperti Pb, Zn, Cd, Cr) biasanya terdapat dalam RM, yang memberikan potensi risiko lingkungan terhadap pemanfaatan sekunder dan pembuangan ekologis (Xu et al., 2022). Unsur-unsur kimia dan komposisi mineral red mud sangat berbeda di berbagai daerah, dan sifat-sifat red mud sebagian besar bergantung pada karakteristik mineralogi dan kimia bauksit serta kondisi pencernaan. Sementara itu, beberapa unsur terdapat dalam bentuk isomorfisme di berbagai mineral red mud, terutama pada mineral yang mengandung besi atau titanium (Li et al., 2021). Oleh karena itu, sangat penting untuk memulihkan berbagai logam berharga dari RM untuk meminimalkan

stok RM dan pemborosan sumber daya sekunder.

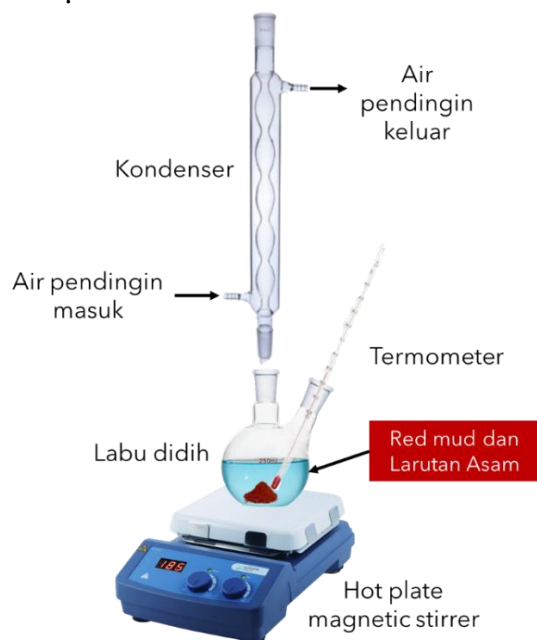
Dengan pesatnya perkembangan industri titanium, penyimpanan dan kadar bijih titanium menurun secara signifikan. Oleh karena itu, mendaur ulang titanium dari sumber daya sekunder telah menjadi prospek yang cerah. Karena kandungan TiO_2 dalam RM biasanya antara 3-15%, pemanggangan reduksi dan pelindian asam merupakan teknologi utama untuk memulihkan titanium dari RM dalam beberapa tahun terakhir (Bonomi et al., 2018). Pemungutan titanium dari RM mencakup beberapa proses, yaitu: pemanggangan reduksi dan acid leaching. Proses acid leaching terutama mencakup empat langkah dasar: sintering reduksi, pelindian air, pemisahan magnetik, dan pelindian asam (Pan et al., 2023). Li dkk. menguraikan rute baru untuk sepenuhnya memulihkan besi, aluminium dan titanium dari RM, termasuk peleburan pra-reduksi, pelindian alkali dan pelindian asam. Lebih dari 85% alumina dan 95% titanium dipulihkan dalam bentuk larutan natrium aluminat dan perovskit. Hal ini tidak hanya meningkatkan pemanfaatan RM, tetapi juga menghilangkan bahaya pembuangan polutan sekunder (Li et al., 2021).

Dibandingkan dengan proses pemanggangan reduksi, proses pelindian asam untuk memulihkan titanium tidak memerlukan kontrol pH yang tepat, yang mudah dipisahkan dari besi yang dipulihkan bersama (Deep et al., 2001). Agatzini-Leonardou dkk. (2008) mengusulkan proses pelindian asam baru untuk meningkatkan pemulihan titanium dari RM dengan ultrasound, dan efek daya ultrasound, konsentrasi asam dan parameter pelindian pada pemulihan titanium diselidiki secara khusus (Agatzini-Leonardou et al., 2008). Hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi pemulihan titanium meningkat dari 65% menjadi 84% ketika ditingkatkan dengan perawatan ultrasound. Kasliwal dan Sai (1999) mengilustrasikan mekanisme reaksi mineral pembawa titanium RM dalam larutan HCl, dan menemukan bahwa proses pelindian sesuai dengan model inti yang menyusut (Kasliwal & Sai, 1999). Zhu dkk. (2012) menggunakan larutan H_2SO_4 untuk mendapatkan kembali titanium dari RM, dan efisiensi pemulihan mencapai 95,2% ketika pelindian pada suhu 150°C selama 120 menit (Guohai et al., 2012). Lebih lanjut, penambahan 5% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ selama proses pelindian menggunakan larutan H_2SO_4

dapat mengurangi energi aktivasi reaksi pemulihan titanium dari 39,77 kJ/mol menjadi 34,61 kJ/mol, dan efisiensi pemulihan yang sesuai meningkat dari 65% menjadi 82% (Zhu et al., 2015).

MATERI DAN METODE

Sampel diterima dalam keadaan campuran kering dan basah mula-mula dikeringkan di dalam oven dengan temperatur $\pm 130^{\circ}\text{C}$ selama 4 jam. Selanjutnya sampel dihaluskan menggunakan grinder dan diayak menggunakan ayakan. Sampel red mud dimasukkan ke dalam labu didih dan ditambahkan dengan larutan HBr dengan volume tertentu. Alat ekstraksi asam (*leaching*) yang terdiri atas labu didih, pemanas berpengaduk magnetik, termometer dan kondensor selanjutnya dirangkai. Pemanas dinyalakan sambil dilakukan pengadukan dengan kuat. Ketika sampel dimasukkan maka proses digesi dihitung sebagai waktu ke-0 kemudian dilanjutkan hingga waktu 2 jam. Setelah 2 jam, ekstraksi dihentikan dan campuran didinginkan. Selanjutnya campuran dipisahkan dengan penyaringan, sehingga diperoleh padatan dan ekstrak hasil *leaching*. Penelitian dilakukan dengan melakukan variasi terhadap konsentrasi asam, temperatur ekstraksi, dan waktu. Alat penelitian dapat dilihat pada Gambar 1

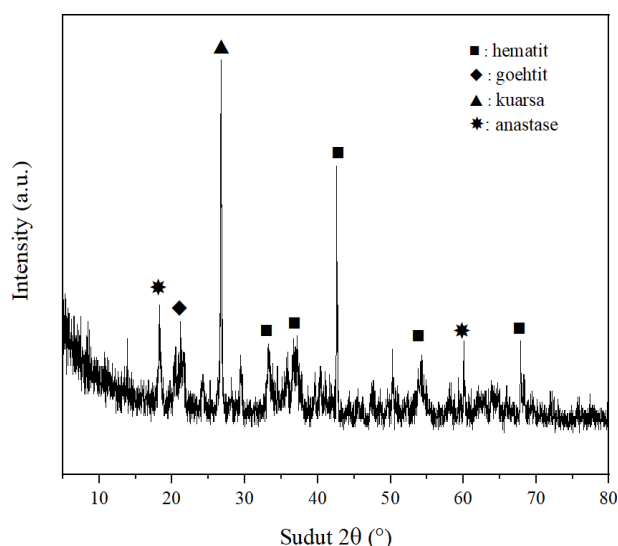


Gambar 1. Alat Penelitian Ekstraksi Asam (*Leaching*) Red Mud.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Red Mud dengan XRD

Red mud biasanya mengandung berbagai jenis mineral yang dapat diidentifikasi melalui pola difraksi XRD. Pada grafik XRD red mud, terlihat adanya beberapa puncak difraksi dengan intensitas yang berbeda pada sudut-sudut tertentu dari 2θ . Gambar 2. menunjukkan hasil analisis X-ray diffraction (XRD) dari red mud. Dari Gambar 2 dapat diamati bahwa puncak utama yang menonjol terletak pada sudut sekitar $18,24^{\circ}$; $21,18^{\circ}$; $26,74^{\circ}$; $33,24^{\circ}$; $36,7^{\circ}$; $42,6^{\circ}$; $54,24^{\circ}$; $60,06^{\circ}$; dan $67,86^{\circ}$. Kehadiran puncak difraksi pada sudut sekitar $33,24^{\circ}$ dan $54,24^{\circ}$ menunjukkan keberadaan hematit (Fe_2O_3). Hematit adalah sumber utama besi dalam red mud dan merupakan komponen yang sangat umum setelah proses pemurnian bauksit. Puncak pada sudut $21,18^{\circ}$ kemungkinan mengindikasikan keberadaan goethit ($\text{FeO}(\text{OH})$), yang juga merupakan salah satu bentuk oksida besi dalam red mud. Goethit biasanya ditemukan dalam red mud yang tidak dikalsinasi. Puncak pada sudut $18,24^{\circ}$ dapat dikaitkan dengan fase anatase dari titanium dioksida. Titania dalam bentuk anatase adalah salah satu komponen minor yang juga ditemukan dalam red mud, mengingat titanium sering terdapat dalam bijih bauksit. Puncak pada sudut $26,74^{\circ}$ dapat diidentifikasi sebagai kuarsa. Kuarsa merupakan salah satu komponen yang umum dalam red mud karena bauksit yang diolah umumnya mengandung silika. Puncak pada $13,86^{\circ}$ mungkin menunjukkan adanya kalsit (CaCO_3). Kehadiran kalsit sering kali merupakan hasil dari penambahan kapur selama proses pengendapan atau pemurnian bauksit. Pola difraksi yang terlihat cukup tajam dan terdefinisi menunjukkan bahwa red mud ini memiliki struktur kristalinitas yang baik. Puncak-puncak yang sempit mengindikasikan kehadiran mineral yang cukup teratur secara struktural. Hal ini sangat penting untuk mengetahui sifat fisik dari red mud tersebut, terutama terkait dengan aplikasi pemanfaatannya dalam bidang material. Analisis XRD terhadap sampel red mud menunjukkan kehadiran beberapa fase mineral utama, seperti kuarsa, hematit, goethit, anatase, dan kalsit.



Gambar 2. Hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) dari Red Mud.

Karakterisasi Red Mud dengan XRF

Kandungan konstituen penyusun dari red mud (RM) dan sampel katalis yang disiapkan diperoleh dari analisis XRF yang ditunjukkan pada Tabel 1. Seperti yang ditunjukkan Tabel 1, komponen utama RM adalah Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , CaO , K_2O , SO_3 , dan Cl . Data menunjukkan bahwa modifikasi RM menyebabkan penurunan komponen alkali dari RM (Na_2O , CaO , dan K_2O) dengan peningkatan bersamaan dalam konten Fe_2O_3 , yang sangat penting untuk aktivitas katalitik. Selanjutnya, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, jumlah S dan Cl dapat dikurangi atau dihilangkan pada saat modifikasi dan kalsinasi RM.

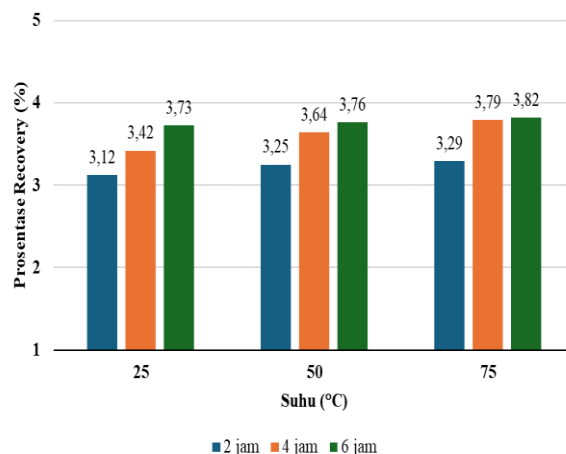
Tabel 1. Hasil Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy.

Sa mp el	Komposisi unsur (% massa)								
	Fe Fe_2O_3 3	Al Al_2O_3 3	Si SiO_2 2	Ti TiO_2 2	N Na_2O O	C CaO O	K K_2O O	S SO_3 3	Cl
R	46	17	1	7	11	1	0	0	0
M	,5	,5	4	3	,6	3	3	2	0
			1			5	7	3	2

Pengaruh Suhu Acid Leaching Terhadap Persentase Recovery Titanium Oksida

Pada suhu 25°C, terlihat tiga nilai persentase recovery berturut-turut sebesar 3,12%; 3,42%; dan 3,73%. Peningkatan nilai recovery dari 3,12% hingga 3,73% menunjukkan adanya peningkatan persentase recovery seiring dengan perubahan parameter atau variabel yang tidak terlihat secara jelas di

grafik, mungkin berupa variasi waktu leaching. Pada suhu yang relatif rendah ini, persentase recovery masih berada di kisaran 3%, menunjukkan bahwa meskipun terdapat peningkatan, hasilnya masih relatif rendah. Ketika suhu dinaikkan menjadi 50°C, diperoleh persentase recovery unsur Titanium adalah 3,25%; 3,64%; dan 3,76% berturut-turut. Pada suhu yang lebih tinggi terdapat peningkatan bertahap pada nilai recovery dengan variasi parameter konsentrasi asam yang sama. Nilai recovery pada suhu 50°C sedikit lebih tinggi dibandingkan pada 25°C, mengindikasikan bahwa peningkatan suhu memberikan dampak positif terhadap efisiensi recovery Titanium, meskipun peningkatannya tidak terlalu drastis. Sedangkan pada 75°C, persentase recovery mencapai 3,29%; 3,79%; dan 3,82%. Dibandingkan dibandingkan dua suhu sebelumnya, terbahwa persentase recovery pada suhu 75°C menunjukkan nilai yang tertinggi. Peningkatan ini memperlihatkan bahwa suhu yang lebih tinggi dalam proses acid leaching dapat meningkatkan efisiensi recovery Titanium, meskipun perbedaannya tidak terlalu signifikan dari 50°C ke 75°C dibandingkan dari 25°C ke 50°C.



Gambar 3. Pengaruh Konsentrasi Acid Leaching Terhadap %Recovery Titanium Oksida.

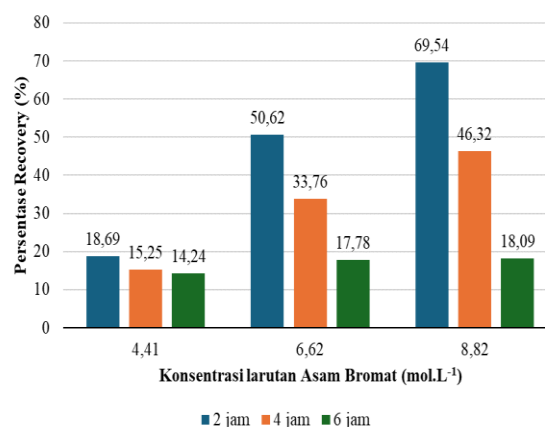
Dari Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa peningkatan suhu berkontribusi terhadap peningkatan persentase recovery Titanium dari lumpur merah, di mana suhu 75°C memberikan hasil recovery terbaik. Selain suhu, ada kemungkinan bahwa parameter lain seperti konsentrasi asam leaching atau waktu proses juga mempengaruhi hasil recovery, terlihat dari variasi pada setiap suhu. Persentase recovery

meningkat dengan bertambahnya suhu, tetapi pada suhu 75°C, peningkatannya mulai melandai, menunjukkan bahwa ada batasan termodinamis atau kinetik dalam peningkatan recovery Titanium pada kondisi suhu tinggi. Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran bahwa suhu merupakan faktor penting dalam recovery Titanium, dan perlu dipertimbangkan variabel lain (misalnya, konsentrasi asam dan durasi leaching) untuk memaksimalkan recovery pada kondisi suhu yang lebih optimal.

Pengaruh Konsentrasi Acid Terhadap Persentase Recovery Titanium Oksida

Pengaruh konsentrasi Asam Hidrobromida terhadap persentase recovery Titanium Oksida dapat dilihat pada Gambar 4. Dari Gambar 4 dapat dijelaskan pengaruh konsentrasi larutan Asam Hidrobromida terhadap persentase recovery unsur titanium dengan memperhatikan tiga variabel waktu reaksi yang berbeda, yaitu 2 jam, 4 jam, dan 6 jam. Gambar 5 menunjukkan hubungan antara konsentrasi larutan Asam Hidrobromida (dalam mol/L) dengan persentase recovery titanium, di mana peningkatan konsentrasi larutan asam dan lamanya waktu reaksi mempengaruhi hasil recovery. Pada konsentrasi 4,41 mol/L, persentase recovery berada di kisaran 18,69% (2 jam), 15,25% (4 jam), dan 14,24% (6 jam). Peningkatan waktu reaksi dari 2 jam hingga 6 jam justru menurunkan persentase recovery. Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi Asam Hidrobromida rendah, waktu reaksi yang lebih lama tidak membantu meningkatkan proses ekstraksi titanium. Reaksi kimia untuk recovery mungkin berjalan lambat atau tidak efisien pada konsentrasi rendah ini, sehingga bahkan dengan waktu reaksi yang lebih lama, peningkatan recovery tidak tercapai. Sedangkan pada konsentrasi 6,62 mol/L, terlihat peningkatan yang signifikan pada 2 jam (50,62%), namun untuk 4 jam recovery menurun menjadi 33,76%, dan untuk 6 jam kembali turun ke 17,78%. Pada penggunaan Asam Hidrobromida pada konsentrasi 6,62 mol/L, waktu reaksi 2 jam memberikan hasil recovery yang terbaik, sedangkan waktu yang lebih lama cenderung menurunkan recovery. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi ini, proses ekstraksi titanium cukup cepat dalam

waktu singkat (2 jam). Namun, dengan memperpanjang waktu reaksi, efek Asam Hidrobromida terhadap titanium mungkin menyebabkan overoxidation atau pembentukan produk samping, yang menghambat efisiensi recovery. Penggunaan Asam Hidrobromida pada konsentrasi 8,82 mol/L menunjukkan hasil recovery yang paling signifikan pada 2 jam (69,54%), namun recovery menurun pada waktu reaksi 4 jam (46,32%) dan bahkan lebih rendah pada 6 jam (18,09%). Pada konsentrasi a Asam Hidrobromida yang lebih tinggi, proses recovery menjadi lebih efisien dalam waktu singkat (2 jam). Tetapi dengan peningkatan waktu reaksi, terjadi penurunan recovery, yang mungkin disebabkan oleh degradasi titanium atau reaksi sekunder yang merusak produk yang terbentuk. Pada konsentrasi ini, jelas bahwa reaksi berlebihan atau kelebihan waktu kontak dengan Asam Hidrobromida menyebabkan penurunan efisiensi.



Gambar 4. Pengaruh Konsentrasi Acid Terhadap Persentase Recovery Unsur Titanium

Waktu reaksi memainkan peran penting dalam mempengaruhi hasil recovery. Pada semua konsentrasi, recovery terbaik tercapai pada waktu reaksi 2 jam. Namun, memperpanjang waktu reaksi hingga 4 jam dan 6 jam cenderung menurunkan hasil recovery, terutama pada konsentrasi yang lebih tinggi. Lamanya waktu reaksi yang lebih dari 2 jam cenderung mengurangi efisiensi recovery pada konsentrasi Asam Hidrobromida yang lebih tinggi. Ini bisa diakibatkan oleh proses over-leaching atau pembentukan produk samping yang tidak diinginkan, yang mengurangi ketersediaan titanium dalam larutan. Selain itu, dalam proses pelindian (leaching), waktu reaksi yang terlalu lama bisa menyebabkan

pembentukan senyawa kompleks yang menghambat pengendapan atau pengurangan unsur titanium yang efisien.

Konsentrasi Asam Hidrobromida berpengaruh besar terhadap proses recovery titanium, di mana konsentrasi yang lebih tinggi (8,82 mol/L) memberikan hasil recovery yang lebih baik dalam waktu singkat (2 jam). Waktu reaksi optimal untuk recovery pada semua konsentrasi adalah 2 jam, di mana terjadi peningkatan signifikan dalam persentase recovery dibandingkan dengan waktu yang lebih lama. Pada konsentrasi tinggi dan waktu reaksi yang terlalu lama, terjadi penurunan efisiensi recovery, yang mungkin disebabkan oleh efek penguraian titanium atau pembentukan produk samping yang tidak diinginkan.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode acid leaching dengan larutan asam hidrobromida (HBr) efektif untuk memulihkan unsur berharga titanium oksida (TiO_2) dari limbah red mud industri pengolahan bauksit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal untuk pemulihan TiO_2 adalah pada suhu 75°C , konsentrasi HBr 8,82 mol/L, dan durasi reaksi 2 jam, yang menghasilkan tingkat recovery hingga 69,54%. Peningkatan suhu dan konsentrasi asam memberikan dampak positif terhadap efisiensi recovery, tetapi durasi reaksi yang terlalu lama justru menurunkan efisiensi akibat pembentukan produk samping. Penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengelolaan limbah industri yang lebih baik tetapi juga mendukung keberlanjutan industri bauksit melalui pengurangan dampak lingkungan dan peningkatan nilai ekonomi dari limbah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Agatzini-Leonardou, S., Oustadakis, P., Tsakiridis, P., Markopoulos, C. 2008. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure. *Journal of hazardous materials*, 157(2-3): 579-586.
- Bonomi, C., Alexandri, A., Vind, J., Panagiotopoulou, A., Tsakiridis, P., Parias, D. 2018. Scandium and titanium recovery from bauxite residue by direct leaching with a Brønsted acidic ionic liquid. *Metals*. 8(10): 834.
- Deep, A., Malik, P., Gupta, B. 2001. Extraction and separation of Ti (IV) using thiophosphinic acids and its recovery from ilmenite and red mud. *Separation Science and Technology*. 36(4): 671-685.
- Guohai, Z., Keqin, W., Hao, W. 2012. Study on recovering titanium dioxide from red mud vitriol leached residue. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*. 7:23-26.
- Huang, Y., Chai, W., Han, G., Wang, W., Yang, S., Liu, J. 2016. A perspective of stepwise utilisation of Bayer red mud: Step two—Extracting and recovering Ti from Ti-enriched tailing with acid leaching and precipitate flotation. *Journal of Hazardous Materials*. 307: 318-327.
- Kasliwal, P., Sai, P. 1999. Enrichment of titanium dioxide in red mud: a kinetic study. *Hydrometallurgy*. 53(1): 73-87.
- Li, S., Pan, J., Zhu, D., Guo, Z., Shi, Y., Dong, T., Lu, S., Tian, H. 2021. A new route for separation and recovery of Fe, Al and Ti from red mud. *Resources, Conservation and Recycling*. 168: 105314.
- Pan, X., Wu, H., Lv, Z., Yu, H., Tu, G. 2023. Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review. *Science of The Total Environmen*. 166686.
- Shim, W.G., Nah, J.W., Jung, H.-Y., Park, Y.-K., Jung, S.C., Kim, S.C. 2018. Recycling of red mud as a catalyst for complete oxidation of benzene. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 60: 259-267.
- Tang, W., Wang, Z., Donne, S., Forghani, M., Liu, Y. 2019. Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete. *Journal of hazardous materials*. 379: 120802.
- Wang, S., Jin, H., Deng, Y., Xiao, Y. 2021. Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 289: 125136.
- Xu, Z.-M., Zhang, Y.-X., Wang, L., Liu, C.-G., Sun, W.-M., Wang, Y.-F., Long, S.-X., He, X.-T., Lin, Z., Liang, J.-L. 2022. Rhizobacteria communities reshaped by red mud based passivators is vital for

reducing soil Cd accumulation in edible amaranth. *Science of the Total Environment*. 826: 154002.

Zhu, X., Li, W., Guan, X. 2015. An active dealkalization of red mud with roasting and water leaching. *Journal of hazardous materials*. 286: 85-91.