



PELINDIAN ZIRKONIUM DARI *TAILING* MAGNETIK PASIR ZIRKON HASIL *ROASTING* MENGGUNAKAN NaOH

Iga Trisnawati^{a,b*}, Gyan Prameswara^a, Kharistya Rozana^b, Himawan Tri Murti Bayu
Petrus^{a,c}, Agus Prasetya^{a,c}, Panut Mulyono^{a*}

^aDepartemen Teknik Kimia, UGM

Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, Indonesia 55281

^bPusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta, 55281

^cUnconventional Georesources Research Center, UGM

Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, Indonesia 55281

*E-mail: trisnawati@batan.go.id, pmulyono@ugm.ac.id

Masuk Tanggal :04-06-2020, revisi tanggal:08-10-2020, diterima untuk diterbitkan tanggal : 26-12-2020

Abstrak

Tailing pertambangan adalah penyebab sebagian besar pencemaran lingkungan yang terkait dengan industri ekstraktif. Peningkatan risiko pencemaran lingkungan telah diamati di seluruh dunia karena sejumlah besar pengolahan bijih kadar rendah. Dalam penelitian ini, pemulihan zirkonium dari *tailing* magnetik pasir zirkon telah diselidiki. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui pengaruh kondisi operasi pencucian terhadap pemulihan zirkonium dari *tailing* magnetik pasir zirkon. *Tailing* magnetik pasir zirkon yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT Monokem Surya. Awalnya, *tailing* magnetik pasir zirkon dipanggang dengan tujuan memisahkan senyawa zirkonium dan silikat sebagai pengotor. Proses pemanggangan telah dilakukan dengan mereaksikan *tailing* magnetik zirkon pasir dan NaOH dengan perbandingan 1: 1 pada 450 °C selama 3 jam. Produk tersebut kemudian dicuci, dikeringkan dan dilindi menggunakan larutan HCl dan H₂SO₄. Untuk mengetahui kinerja pelindian, kondisi operasi bervariasi termasuk suhu (30 °C-110 °C), konsentrasi asam (0,125M-2M) dan rasio padat terhadap cair (0,05 g/mL-0,25 g/mL). Ditemukan bahwa pemulihan zirkonium mencapai optimal ketika proses pelindian menggunakan 0,5 M HCl dan H₂SO₄. Pada kondisi di atas menghasilkan pemulihan untuk zirkonium dengan 88% HCl dan 26% H₂SO₄.

Kata Kunci: Pelindian, zirkon, *tailing* magnetik, pemanggangan

Abstract

Mine tailings are the cause of most environmental pollution associated with extractive industries. Increasing the risk of environmental pollution has been observed world-widely due to no small number of low-grade ore processing. In this study, the recovery of zirconium from zircon sand magnetic tailings has been investigated. The study aims to determine the effect of the operating conditions of leaching on the recovery of zirconium from magnetic sand tailings. The zircon sand magnetic tailings used in this analysis was obtained from Monokem Surya Ltd. Initially, zircon sand magnetic tailings were roasted with the intention of separating zirconium and silicate compounds as impurities. The roasting process was carried out with the reaction of zircon sand magnetic tailings and NaOH at a ratio of 1:1 at 450 °C for 3 hours. The commodity was then washed, dried, and washed using HCl and H₂SO₄ solutions. The operating conditions, including temperature (30 °C-110 °C), acid concentration (0.125M-2M) and solid to liquid ratio (0.05gr/ml-0.25gr/ml) were varied to determine the leaching efficiency. The recovery of zirconium was found to have reached its peak when 0.5M of HCl and H₂SO₄ were used in the leaching process. Recovery of 88% and 26% for zirconium was achieved using HCl and H₂SO₄, respectively.

Keywords: Leaching, zircon, magnetic tailing, roasting

1. PENDAHULUAN

Tailing merupakan limbah yang dihasilkan oleh kegiatan tambang, dan kehadirannya dalam dunia pertambangan tidak bisa dihindari [1]. Sebagai limbah sisa pengolahan batuan-batuan yang mengandung mineral, *tailing* umumnya masih mengandung mineral-mineral berharga [2].

Pemrosesan mineral secara tradisional dapat menghasilkan *tailing* dalam jumlah besar dan deposit *tailing* ini harus menjadi perhatian serta penanganan dengan hati-hati [3]-[4]. Untuk mengurangi masalah *tailing* yang tidak terhindarkan ini, banyak teknik pemulihan *tailing* yang telah dilakukan, tetapi dengan hilangnya beberapa komponen yang berpotensi berharga [2], [5]. Sejauh ini kebanyakan *tailing* hanya disimpan dalam bendungan *tailing* setelah proses pengambilan mineral berharga dilakukan.

Mineral merupakan sumber daya yang tidak terbarukan, sehingga cadangan mineral dari tahun ke tahun jumlahnya semakin menurun, dan oleh karena itu bagaimana memaksimalkan pemanfaatan sumber daya mineral secara relevan telah mendapatkan perhatian lebih [2]. Daur ulang sumber sekunder memainkan peran yang semakin penting dalam hal ini [6]. Sebagai contoh, pemulihan logam-logam berharga (logam tanah jarang, niobium, besi dan titanium) dari *tailing* tambang telah menjadi area penelitian populer di beberapa tahun terakhir [2], [7]-[10]. Penggunaan kembali sumber daya sekunder memiliki tujuan yang sama yaitu memaksimalkan pemanfaatan sumber daya dan sementara itu mengurangi dampak yang berpotensi buruk terhadap lingkungan.

Dalam beberapa tahun terakhir, zirkonium dan paduannya menjadi semakin penting dan menarik untuk aplikasi yang luas [11]-[13]. Indonesia termasuk salah satu negara penghasil pasir zirkon dengan kontribusi sebesar 4% [14]. Dikarenakan produksi yang terus menerus selama bertahun-tahun, maka diperoleh *tailing* dalam jumlah besar. Menanggapi hal tersebut, penggunaan kembali *tailing* semakin mendesak. Mineral zirkon ($ZrSiO_4$) kebanyakan berasosiasi dengan mineral berharga lain seperti monasit, senotim dan ilmenit [15]. Keuntungan mineral zirkon dilakukan melalui beberapa tahapan proses yaitu pemisahan berdasarkan perbedaan *specific gravity* dilanjutkan dengan pemisahan berdasarkan perbedaan sifat kemagnetan mineral. Hasil pemisahan sifat kemagnetan mineral diperoleh mineral zirkon sebagai mineral non magnetik dan *tailing* magnetik berupa beberapa campuran mineral berharga [15].

Dalam penelitian ini, pemungutan zirkonium dari *tailing* magnetik pasir zirkon dipelajari secara terperinci. Zirkon mempunyai stabilitas yang tinggi ($dG, 1400K = -1498,1 \text{ kJmol}^{-1}$) [16], sehingga dekomposisi zirkon membutuhkan suhu yang tinggi dan bahan kimia yang reaktif. Proses dekomposisi yang banyak digunakan melibatkan fusi kaustik zirkon dengan menggunakan kelebihan natrium hidroksida [17]. Natrium zirkonat terbentuk bersama dengan natrium silikat, dan semua produk hasil dekomposisi ditambahkan air untuk melarutkan natrium silikat dan menghidrolisis natrium zirkonat membentuk $Zr(OH)_4$ [16]. Hidroksida yang terbentuk kemudian dapat disaring dan dikalsinasi ke ZrO_2 atau diolah dengan asam untuk diproses lebih lanjut menjadi senyawa lain.

Karena terbatasnya informasi yang tersedia dalam literatur tentang pemulihan zirkonium dari *tailing* magnetik pasir zirkon, maka penelitian yang kami lakukan bertujuan untuk menyelidiki kondisi optimum dari pelindian zirkonium dalam asam menggunakan *tailing* magnetik pasir zirkon sebagai bahan baku sekunder. Studi ini diharapkan dapat berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang pelindian zirkonium tidak hanya dari *tailing* magnetik pasir zirkon tetapi juga dari berbagai *tailing* mineral yang mengandung zirkonium.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1 Material

Tailing pasir zirkon yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PT Monokem Surya. Komposisi kimia dianalisis menggunakan XRF (*x-ray fluorescence*) dan ditunjukkan pada Tabel 1. Analisis XRD (*x-ray diffraction*) sampel magnetik *tailing* pasir zirkon dilakukan menggunakan instrumen PANalytical AERIS Research DY 844. NaOH dan H_2SO_4 analitik digunakan dalam seluruh percobaan ini.

2.2 Prosedur Penelitian

Tailing magnetik pasir zirkon dengan ukuran -120 mesh dipanggang dengan NaOH pada suhu 450°C selama 3 jam dalam sebuah tungku. Rasio massa NaOH dengan *tailing* magnetik pasir zirkon adalah 1:1. Produk pemanggaan dicuci dengan air suling panas dalam kondisi operasi: 80°C , 1 jam, rasio cairan-padatan 10mL/g. Setelah selesai, larutan dipisahkan dengan cepat dengan filtrasi vakum. Hasil padatan dari tahap pencucian dikeringkan di dalam oven. Padatan hasil pencucian yang telah kering digunakan sebagai umpan *leaching* menggunakan H_2SO_4 dan HCl. Dalam percobaan ini *leaching* dipelajari

dengan teknik *batch* dengan waktu reaksi selama 1 jam, konsentrasi asam bervariasi antara 0,125 M dan 2 M, perbandingan padatan/cairan bervariasi antara 0,05 dan 0,25 (g/mL) dan suhu bervariasi antara suhu kamar dan 110 °C. Pada akhir tiap tes, padatan sisa *leaching* dianalisis untuk mengetahui sisa zirkon yang tidak sempurna saat proses *leaching* menggunakan XRF Epsilon 4. Persentase *leaching* (L,%) dari zirkon dapat dihitung sebagai persamaan (1).

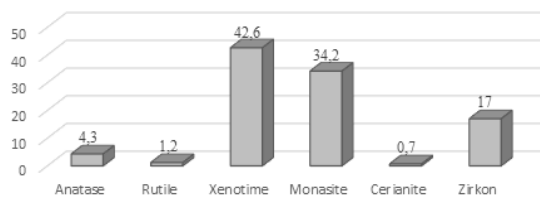
$$L(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana C_0 adalah konsentrasi zirkon fase padat awal, dan C_1 adalah konsentrasi zirkon fase padat sisa *leaching*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi Mineralogi dari *Tailing* Magnetik Pasir Zirkon

Xenotime dikonfirmasi sebagai fase utama dalam pasir zirkon dari hasil XRD (*x-ray diffraction*). Selain xenotime, monasit, zirkon, anatase, rutil dan cerianite juga terdapat dalam mineral *tailing* pasir zirkon. Rincian masing-masing mineral disajikan pada Gambar 1.

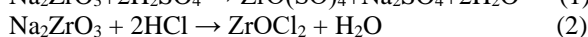


Gambar 1. Presentase berbagai mineral dalam *tailing* magnetic pasir zirkon

3.2 Pelindian Zirkonium

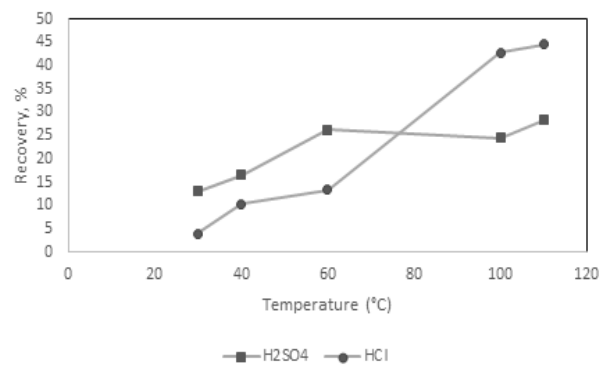
Produk alkali fusi yang tidak larut, yang diperoleh dari hasil pelindian sebelumnya menggunakan air terdiri dari natrium zirkonat, zirkon oksida terhidrasi, natrium silikat residu, asam silikat, sisa mineral zirkon yang merupakan reaksi antara mineral zirkon yang terdapat pada *tailing* magnetik dengan NaOH [17]. Sedangkan untuk mineral logam tanah jarang (monasit dan xenotim), produk alkali fusi yang tidak larut berupa logam tanah jarang hidroksida [18]-[19]. Untuk mineral titanium dalam bentuk rutil dan anatase, produk hasil alkali fusi yang tidak larut berupa natrium titanat [20]-[21].

Reaksi senyawa zirkon dan silikon yang merupakan hasil dari produk alkali fusi mineral zirkon dalam H_2SO_4 dan HCl dapat diwakili oleh reaksi kimia (1) dan (2) [17], [22]



3.2.1 Pengaruh Suhu

Suhu merupakan parameter yang penting dalam menentukan kondisi pelindian yang optimum. Pelindian dilakukan dalam kisaran suhu ruang hingga 110 °C untuk konsentrasi asam 2 M. Gambar 2 menyajikan pengaruh suhu pada pelindian zirkon menggunakan HCl dan H_2SO_4 . Perubahan suhu dari suhu ruangan menjadi 100 °C meningkatkan pemungutan zirkonium dari 13% menjadi 24% untuk reagen pelindian H_2SO_4 . Sedangkan untuk reagen pelindian HCl, pemungutan zirkonium meningkat menjadi 44%. Meningkatkan suhu lebih lanjut dalam proses pelindian akan menurunkan hasil pemungutan zirkonium [16], hal ini mungkin disebabkan karena terjadinya presipitasi oksida hidro dari zirkonium [23]. Fenomena yang sama juga diamati pada logam transisi lain seperti nikel [24] dan titanium [16].

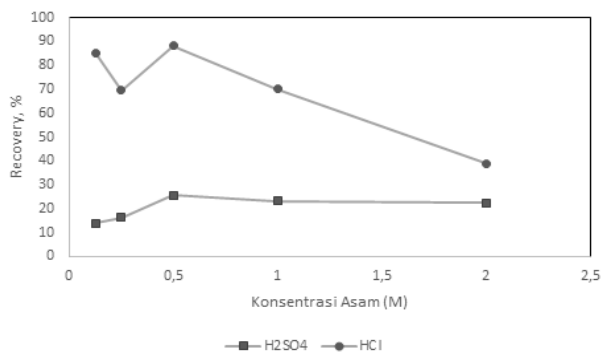


Gambar 2. Pengaruh suhu pada pelindian menggunakan HCl dan H_2SO_4

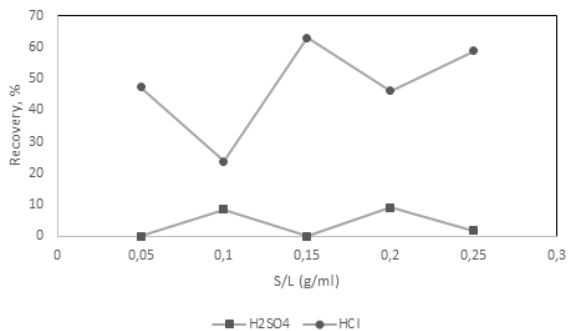
3.2.2 Pengaruh Konsentrasi

Konsentrasi asam sebagai reagen pelindian merupakan parameter yang sangat berpengaruh dalam proses pelindian mineral [25]. Pengaruh konsentrasi asam terhadap hasil *recovery* zirkon dipelajari pada rentang konsentrasi asam antara 0,125 M-2 M pada suhu 80 °C. Penggunaan HCl dan H_2SO_4 sebagai reagen pelindian juga dibandingkan dalam penelitian ini. Hasil yang diperoleh untuk pemungutan Zr (*Zr recovery*) karena pengaruh konsentrasi asam menggunakan HCl dan H_2SO_4 dapat dilihat pada Gambar 3. Pemungutan zirkon meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi asam pada pelindian menggunakan H_2SO_4 . Meningkatkan konsentrasi asam dari 0,125 M menjadi 2 M, pemungutan zirkonium meningkat dari 14% menjadi 22%. Hal ini dikarenakan peningkatan konsentrasi reaktan meningkatkan laju kecepatan reaksi pelindian [16]. Namun hal serupa tidak berlaku untuk pemungutan zirkonium menggunakan HCl. Dengan meningkatkan konsentrasi asam pemungutan zirkonium cenderung semakin turun,

hal ini dapat dikaitkan dengan pembentukan silika (aspek *gel*). *Gel* ini mengganggu proses filtrasi dan dapat dihindari dengan menggunakan konsentrasi HCl yang rendah selama proses pelindian zirkonium menggunakan HCl [17]. Selain itu HCl lebih selektif terhadap senyawa-senyawa lain hasil produk alkali fusi (Ti dan logam tanah jarang) dibandingkan dengan Zr. Dari penelitian Prameswara, dkk., [19], [26] pemungutan senyawa Ti dan logam tanah jarang memiliki kecenderungan meningkat dengan meningkatnya konsentrasi HCl.



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi HCl dan H₂SO₄ pada pelindian zirkonium suhu 80 °C



Gambar 4. Pengaruh rasio padat-cair pada pelindian zirkonium menggunakan H₂SO₄ dan HCl

3.2.3 Pengaruh Padatan/Cairan

Efek rasio padat cair dalam kisaran 0,05-0,25 g/ml telah dipelajari pada 80 °C, konsentrasi asam awal 2M dan waktu pelindian 60 menit. Dalam reaksi kimia cair dan padat, rasio cair-padatan merupakan salah satu faktor penting. Diketahui bahwa rasio padatan dengan cairan yang lebih rendah dapat mengurangi viskositas campuran sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan massa antara padatan dan cairan [27]. Gambar 4 menyajikan pengaruh rasio padatan-cairan pada pelindian zirkonium menggunakan H₂SO₄ dan HCl. Hasil menunjukkan bahwa tidak terjadi peningkatan nilai pemungutan secara signifikan untuk rasio padatan - cairan yang berbeda. Hasil ekstraksi zirkonium ini menunjukkan bahwa difusi

eksternal reagen pelindian dapat memenuhi kebutuhan reaksi pelindian di bawah rasio cairan-padatan ini. Sehingga dapat disimpulkan bahwa proses pelindian zirkonium dikendalikan oleh difusi internal atau laju reaksi kimia [27]. Dari hasil pelindian zirkonium menggunakan HCl atau H₂SO₄, hasil pelindian maksimum mencapai 63%.

4. KESIMPULAN

Dari hasil percobaan dapat diperoleh kesimpulan bahwa konsentrasi asam, perbandingan padatan dan cairan serta suhu berpengaruh terhadap proses pelindian. Semakin tinggi konsentrasi asam yang digunakan, mengakibatkan presentase pemungutan zirkonium semakin menurun. Hal ini disebabkan karena terbentuknya *gel* silika yang mengganggu proses filtrasi, sehingga menambah jumlah residu dalam proses pelindian. HCl memberikan hasil yang lebih baik sebagai reagen pelindi dibandingkan dengan H₂SO₄. Kondisi optimum proses pelindian diperoleh dengan reagen pelindi berupa HCl dengan konsentrasi sebesar 0,5 M, perbandingan padatan dan cairan 0,15g/mL, dan suhu operasi pada 100 °C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jendral Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah memberikan bantuan dana penelitian dalam program PDD (2898/UN1.DITLIT/DIT-LIT/LT/2019). Iga Trisnawati menghargai dukungan keuangan dari Beasiswa Sainstek-Kemenristek/BRIN

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Schoenberger, "Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities," *Resour. Policy*, vol. 49, pp. 119–128, 2016.
- [2] J. Zhai, H. Wang, P. Chen, Y. Hu, dan W. Sun, "Recycling of iron and titanium resources from early tailings: From fundamental work to industrial application," *Chemosphere*, vol. 242, pp. 125178, 2020.
- [3] Z. Bian, X. Miao, S. Lei, S. E. Chen, W. Wang, dan S. Struthers, "The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes," *Science*, vol. 337, no. 6095, pp. 702–703, 2012.
- [4] L. Wang, B. Ji, Y. Hu, R. Liu, dan W. Sun, "A review on in situ phytoremediation of mine tailings," *Chemosphere*, vol. 184, pp.

- 594–600, 2017.
- [5] M. J. Khan dan D. L. Jones, “Effect of composts, lime and diammonium phosphate on the phytoavailability of heavy metals in a copper mine tailing soil,” *Pedosph. An Int. J.*, vol. 19, no. 5, pp. 631–641, 2009.
- [6] L. Raghupathy dan A. Chaturvedi, “Secondary resources and recycling in developing economies,” *Sci. Total Environ.*, vol. 461–462, pp. 830–834, 2013.
- [7] X. Lyu, G. Yao, Z. Wang, Q. Wang, dan L. Li, “Hydration kinetics and properties of cement blended with mechanically activated gold mine tailings,” *Thermochim. Acta*, vol. 683, pp. 178457, 2020.
- [8] B. Bagheri, J. Vazifeh Mehrabani, dan S. Farrokhpay, “Recovery of sphalerite from a high zinc grade tailing,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 381, pp. 120946, 2020.
- [9] G. T. Munive, M. A. Encinas, M. M. Salazar Campoy, V. E. Álvarez, V. M. Vazquez, dan D. C. Choque, “Leaching gold and silver with an alternative system, glycine: Thiosulfate from mineral tailings,” *Jom*, 2019. DOI : 10.1007/s11837-019-03652-z.
- [10] X. L. Yu, L. Bai, Q. C. Wang, J. Liu, M. Y. Chi, dan Z. C. Wang, “Recovery of rare earths, niobium, and thorium from the tailings of giant bayan obo ore in china,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 43, no. 3, pp. 485–493, 2012.
- [11] C. H. V. G. K. Murty, R. Upadhyay, dan S. Asokan, “Recovery of zircon from Sattankulam deposit in India-problems and prospects,” *6th Int. Heavy Miner. Conf. ‘Back to Basics’*, pp. 69–74, 2007.
- [12] R. K. Biswas, M. A. Habib, A. K. Karmakar, dan M. R. Islam, “A novel method for processing of Bangladeshi zircon: Part I: Baking, and fusion with NaOH,” *Hydrometallurgy*, vol. 103, no. 1–4, pp. 124–129, 2010.
- [13] S. Srikanth, V. L. Devi, dan R. Kumar, “Unfolding the complexities of mechanical activation assisted alkali leaching of zircon (ZrSiO₄),” *Hydrometallurgy*, vol. 165, pp. 125–136, 2016.
- [14] T. Suseno, “Analisis prospek pasir zirkon Indonesia di pasar dunia,” *Teknologi Miner. dan Batubara*, vol. 11, no. 1, pp. 61–77, 2015.
- [15] H. Poernomo, D. Biyantoro, dan M. V. Purwani, “Kajian konsep teknologi pengolahan pasir zirkon lokal yang mengandung monasit, senotim, dan ilmenit,” *Eksplorium*, vol. 37, no. 2, pp. 73–88, 2016.
- [16] T. Makanyire, A. Jha, dan S. Sutcliffe, “A kinetic analysis of acid leaching of niobium and zirconium from titania waste residue stream: An energy efficient methodology for the reclamation of metal values,” *Energy Technol. 2015 Carbon Dioxide Manag. Other Technol.*, pp. 115–122, 2016.
- [17] R. J. F. Da Silva, A. J. B. Dutra, dan J. C. Afonso, “Alkali fusion followed by a two-step leaching of a Brazilian zircon concentrate,” *Hydrometallurgy*, vol. 117–118, pp. 93–100, 2012.
- [18] I. Trisnawati, G. Prameswara, P. Mulyono, A. Prasetya, dan H. T. B. M. Petrus, “Sulfuric acid leaching of heavy rare earth elements (HREEs) from Indonesian zircon tailing,” *Int. J. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 804–816, 2020.
- [19] G. Prameswara, I. Trisnawati, H. Poernomo, P. Mulyono, A. Prasetya, dan H. T. B. M. Petrus, “Kinetics of yttrium dissolution from alkaline fusion on zircon tailings,” *Mining, Metall. Explor.*, vol. 37, no. 4, pp. 1297–1305, 2020.
- [20] R. Subagja, A. Royani, dan P. Prasetyo, “Pengaruh penambahan NaOH, temperatur dan waktu terhadap pembentukan fasa natrium titanat dan natrium ferit pada proses pemanggangan ilmenit Bangka,” *Metalurgi*, vol. 27, pp. 241–249, 2012.
- [21] A. Sari, J. Kimia, F. Matematika, dan P. Alam, “Studi pengaruh dekomposisi pasir besi dengan NaOH terhadap pemisahan titanium,” *J. Sains dan Seni Pomits*, pp. 0–6, 2003.
- [22] R. K. Biswas, M. A. Habib, dan M. R. Islam, “A novel method for processing of Bangladeshi zircon: Part II: Leaching of zircon-caustic fused mass by hydrochloric acid,” *Hydrometallurgy*, vol. 103, no. 1–4, pp. 130–135, 2010.
- [23] G. L. J. P. da Silva, M. L. C. P. da Silva, dan T. Caetano, “Preparation and characterization of hydrous zirconium oxide formed by homogeneous precipitation,” *Mater. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 149–153, 2002.
- [24] A. S. Madeja, “Kinetics of Mo, Ni, V and Al leaching from a spent hydrodesulphurization catalyst in a

- solution containing oxalic acid and hydrogen peroxide,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 186, no. 2–3, pp. 2157–2161, 2011.
- [25] H. S. E. A. Gustiana, I. M. Bendiyasa, H. T. B. M. Petrus, F. R. Mufakhir, dan W. Astuti, “Pelindian nikel dari bijih limonit low-grade Pomalaa menggunakan pelarut asam asetat,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan*, pp. 1–7, 2018.
- [26] G. Prameswara, P. Mulyono, A. Prasetya, H. Poernomo, dan I. Trisnawati, “Ekstraksi logam tanah jarang (LTJ) dan logam berharga hasil fusi alkali tailing zirkon,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan*, pp. 1–7, 2019.
- [27] Y. Huang, Z. Dou, T. Zhang, dan J. Liu, “Leaching kinetics of rare earth elements and fluoride from mixed rare earth concentrate after roasting with calcium hydroxide and sodium hydroxide,” *Hydrometallurgy*, vol. 173, pp. 15–21, 2017.