

Studi Ekstraksi Magnesium dan Besi Dari *Nickel Matte Slag* Dengan Menggunakan Pelarut Asam Sulfat

Diva Vareliya Suharman¹, Sufriadin^{1}*

¹Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
Kampus Teknik, Jl. Poros Malino, Romangloe, Bontomarannu, Gowa 92171

*email: sufri.as@unhas.ac.id

SARI

Nickel matte slag merupakan limbah hasil dari proses peleburan bijih nikel laterit yang masih banyak mengandung unsur-unsur logam yang tinggi seperti magnesium, besi, dan silikon. Oleh karena itu, dilakukan penelitian pelindian magnesium dan besi dari *nickel matte slag* dengan metode *atmospheric leaching* menggunakan pelarut asam sulfat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan mineralogi dan kimia *nickel matte slag*, menganalisis disolusi mineral selama proses pelindian serta menganalisis tingkat pelindian magnesium dan besi. Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode mikroskopis dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk analisis mineralogi serta metode *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) untuk analisis kadar Mg dan Fe *nickel matte slag*. Percobaan pelindian menggunakan suhu, waktu, dan konsentrasi sebagai variabel percobaan. Hasil analisis mineralogi menunjukkan komposisi mineral terdiri dari forsterit, enstatit, magnesioferit dan kuarsa. Hasil analisis XRD residu menunjukkan bahwa mineral enstatit dan magnesioferit tidak terdisolusi, sementara olivin terdisolusi menjadi magnesium sulfat dan silika amorf selama proses pelindian. Hasil analisis AAS sampel awal menunjukkan *nickel matte slag* mengandung Mg sebesar 20,09% dan Fe sebesar 24,93%. Tingkat pelindian maksimum Mg sebesar 41,37% dan Fe sebesar 9,33 % yang diperoleh pada pelindian dengan konsentrasi H_2SO_4 6 M dan suhu pelindian 90°C.

Kata kunci: Terak *nickel matte*; pelindian atmosferik; asam sulfat; olivin.

ABSTRACT

Nickel matte slag is a waste product from the smelting process of laterite nickel ore which still contains high levels of metal elements such as magnesium, iron, and silicon. Therefore, research was carried out on leaching magnesium and iron from nickel matte slag using the atmospheric leaching method using sulfuric acid. This research aims to determine the mineralogical and chemical characteristics of nickel matte slag, analyze the behavior of minerals during the leaching process, and analyze the leaching degree of magnesium and iron

How to Cite: Suharman, D.V., Sufriadin., 2023. Studi Ekstraksi Magnesium dan Besi Dari *Nickel Matte Slag* Dengan Menggunakan Pelarut Asam Sulfat. Jurnal Geomine, 11 (3): 227 - 236.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia
Address:
Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:
geomine@umi.ac.id

Article History:

Submit 26 Juli 2023

Received in from 21 November 2023

Accepted 31 Desember 2023

Available online

Licensed By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



The analytical methods used in this research are the microscopic method and X-ray diffraction (XRD) for mineralogical analysis and the Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) method for analyzing nickel matte slag content. The leaching experiment used temperature, time, and concentration as research variables. The results of the mineralogical analysis of nickel matte slag show that the mineral composition consists of forsterite, enstatite, magnesioferrite, and quartz. The results of XRD analysis of leached residue showed that enstatite and magnesioferrite were not dissolved, while olivine was dissolved and it was transformed into magnesium sulfate and amorphous silica. The results of the AAS analysis of the initial sample showed that the nickel matte slag contains 20.09% Mg and 24.93% Fe. The maximum leaching rate of Mg was 41.37% and Fe was 9.33% which was obtained at an H_2SO_4 concentration of 6 M and a leaching temperature of 90°C.

Keyword: Nickel matte slag; atmospheric leaching; sulfuric acid; olivine.

PENDAHULUAN

Penambangan mineral menjadi salah satu sektor penting bagi perkembangan ekonomi sebuah negara. Dalam proses pengolahan mineral, terdapat banyak limbah hasil dari proses pengolahan tersebut (Arif, 2018). Matte slag adalah sisa dari pengolahan bijih sulfida dengan cara peleburan. Matte slag masih mengandung berbagai macam unsur terutama, besi dan magnesium dalam bentuk mineral silikat (Pei et al., 2019). Oleh karena itu, perlu dilakukan proses pengolahan untuk memisahkan unsur-unsur yang terkandung dalam *matte slag* agar dapat dimanfaatkan kembali.

Kegunaan magnesium sangat relevan dengan potensi ekstraksi magnesium dari nikel matte slag. Magnesium memiliki sifat-sifat yang dibutuhkan dalam memproduksi bahan-bahan yang bernilai ekonomi tinggi (Ayanda et al., 2017). Salah satu kegunaan utama magnesium adalah sebagai material struktural yang ringan namun kuat. Dalam industri otomotif, penggunaan magnesium dalam komponen mobil dapat mengurangi bobot kendaraan, meningkatkan efisiensi bahan bakar, dan mengurangi emisi karbon. Selain itu, magnesium juga digunakan dalam industri penerbangan untuk komponen struktural pesawat terbang yang ringan namun tahan terhadap kekuatan dan tekanan yang ekstrem. Dalam industri konstruksi, magnesium juga dapat digunakan untuk struktur bangunan yang memerlukan kekuatan tinggi dan ringan, seperti jembatan dan struktur atap (Al-Khribash, 2015).

Sementara itu, besi juga memiliki berbagai macam aplikasi penting. Logam ini paling banyak digunakan di dalam dunia industri. Ekstraksi besi dari nikel matte slag menjadi alternatif dalam memenuhi permintaan yang terus meningkat (Chen et al., 2018). Besi memiliki kekuatan yang tinggi, daya tahan korosi yang baik, dan kemampuan untuk dibentuk menjadi berbagai bentuk dan ukuran. Dalam industri konstruksi, besi digunakan sebagai bahan struktur bangunan, jembatan, dan infrastruktur lainnya. Dalam industri otomotif, besi digunakan dalam pembuatan mesin, rangka kendaraan, dan komponen lainnya. Selain itu, besi juga digunakan dalam produksi baja, yang merupakan bahan dasar

penting dalam banyak industri dan aplikasi, termasuk otomotif, konstruksi, dan manufaktur (Chou et al., 2012).

Metode ekstraksi logam dari matte slag telah dikembangkan selama beberapa dekade, dengan menggunakan pelarut yang berbeda. Salah satu pelarut yang paling umum digunakan adalah ekstraksi dengan menggunakan pelarut asam sulfat. Pelarut asam sulfat dapat mengubah oksida atau sulfida logam dalam matte slag menjadi bentuk yang lebih mudah larut. Selain itu, pelarut asam sulfat juga dapat menghasilkan residu yang kurang beracun jika dibandingkan dengan pelarut lainnya (Ma et al., 2018). Metode ekstraksi logam dari matte slag dengan pelarut asam sulfat biasanya melibatkan beberapa tahapan, termasuk perlakuan, pelindian, dan presipitasi. Tahapan pra perlakuan biasanya melibatkan penggilingan, pengeringan, dan pengayakan untuk memperkecil ukuran partikel dan meningkatkan area permukaan. Proses ini memungkinkan pelarut asam sulfat dapat meresap ke dalam struktur kristal dan meningkatkan efisiensi ekstraksi. Tahap ekstraksi adalah tahap utama dalam proses ekstraksi logam dari matte slag (Jain & Agrawal, 2013).

Pada tahap pemurnian, logam yang larut dalam pelarut asam sulfat dipisahkan dari residu dan pengotor lainnya. Salah satu cara yang umum digunakan untuk pemurnian adalah proses presipitasi dengan menggunakan alkali atau sulfat. Proses ini melibatkan pengendapan logam yang dilarutkan dalam pelarut dengan menambahkan larutan alkali atau sulfat. Logam yang diendapkan kemudian dipisahkan dari larutan dan dikeringkan untuk mendapatkan logam dalam bentuk padat (Buxton et al., 1996). Beberapa parameter proses dapat mempengaruhi efisiensi ekstraksi, seperti konsentrasi asam sulfat, suhu, waktu reaksi, dan rasio pelarut terhadap bahan. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa konsentrasi asam sulfat 2 M untuk mengekstraksi magnesium dari *nickel slag* menghasilkan efisiensi sebesar 89,2% pada suhu 40°C selama 60 menit dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi magnesium (Lu et al., 2020). Namun, penelitian lain menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu terhadap bahan dapat mengurangi efisiensi ekstraksi dimana hasilnya menunjukkan bahwa ekstraksi magnesium mencapai efisiensi 85,3% pada suhu 80°C selama 3 jam (Zhang et al., 2018).

Disolusi merupakan proses di mana logam-logam tertentu dalam padatan larut dalam pelarut kimia tertentu. Proses ini merupakan langkah awal yang penting dalam banyak metode ekstraksi logam, baik itu ekstraksi hidrometalurgi maupun pirometalurgi (Gupta & Mukherjee, 2011). Meskipun disolusi merupakan langkah penting dalam ekstraksi logam, ada beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah kemampuan pelarut dalam melarutkan logam dari bijih. Beberapa bijih mungkin memiliki kadar logam yang sangat rendah, sehingga disolusi mungkin memerlukan waktu yang lama atau tidak ekonomis. Selain itu, ada juga masalah terkait dengan limbah dan dampak

lingkungan dari penggunaan pelarut kimia dalam proses disolusi. Oleh karena itu, pengembangan metode ekstraksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan terus menjadi fokus penelitian dalam industri ekstraksi logam (Wang et al., 2018).

Dengan demikian, penelitian tentang ekstraksi magnesium dan besi dari nikel matte slag menggunakan pelarut asam sulfat memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan industri dan lingkungan. Dengan memahami dan mengoptimalkan proses ekstraksi, sehingga dapat memanfaatkan potensi magnesium dan besi yang terkandung dalam limbah nikel matte slag secara efisien dan berkelanjutan. Hal ini akan membantu meningkatkan keberlanjutan industri peleburan logam, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, dan memperluas penggunaan magnesium dan besi dalam berbagai aplikasi industri.

METODE PENELITIAN

Sampel *nickel matte slag* yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *slag dump* PT Vale Indonesia Tbk yang berlokasi di Desa Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Karakterisasi bijih yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua yaitu karakterisasi mineralogi dan karakterisasi kimia. Karakterisasi mineralogi menggunakan metode mikroskopis dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Karakterisasi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS).

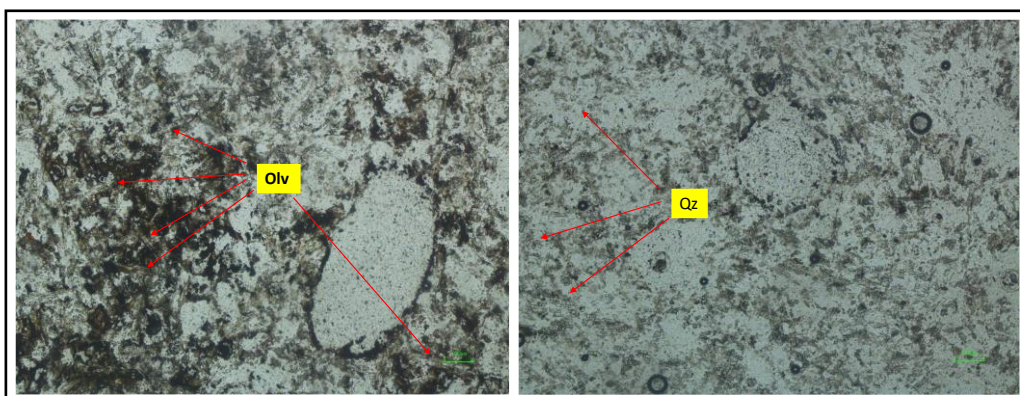
Percobaan pelindian dilakukan menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) dengan variasi pelindian sebagai berikut: konsentrasi pelarut 1 M, 2 M, 4 M, dan 6 M, waktu pelindian 30 menit, 60 menit, 90 menit dan 120 menit, dan suhu pelindian 60°C , 70°C , 80°C , dan 90°C . Rasio padatan-cairan (1:10 g/ml) dan kecepatan pengadukan 450 rpm. Setelah percobaan pelindian, pemisahan larutan kaya dan residu pelindian dipisahkan menggunakan kertas saring whatmann no. 42. Larutan kaya selanjutnya dianalisis menggunakan AAS untuk mengetahui kadar Mg dan Fe dari hasil pelindian, sedangkan padatan sisa dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui mineral-mineral yang terkandung dalam residu hasil pelindian.

HASIL PENELITIAN

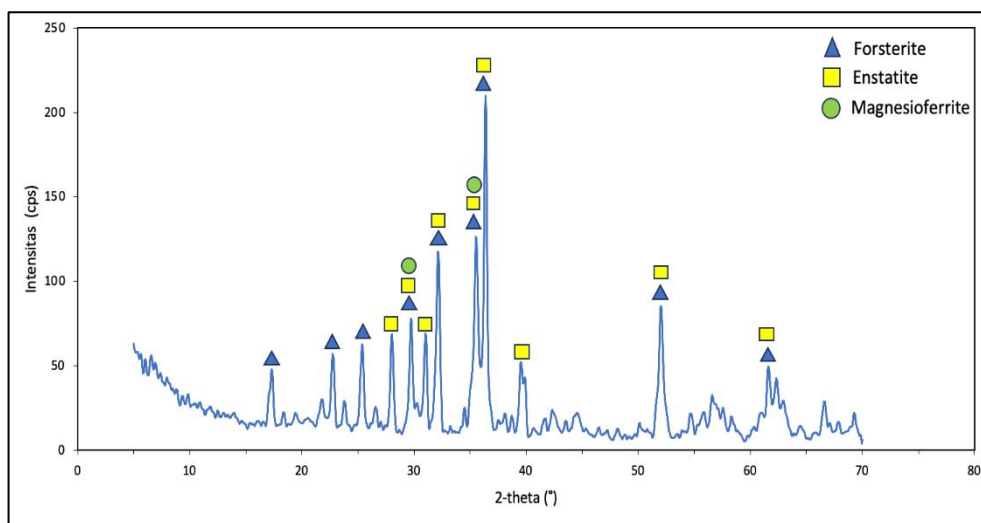
Karakteristik Sampel Nickel Matte Slag

Fotomikrograf hasil analisis mikroskopis sampel Ni-matte slag dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan difraktogram sampel *nickel matte slag* ditunjukkan oleh Gambar 2. Hasil pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa sampel terutama disusun oleh olivin dengan komposisi kimia $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. Keberadaan olivin ditandai dengan bentuk kristal

primatik – granular, berwarna hijau kecoklatan, serta ukuran mineral olivin yang nampak adalah ukuran kristal halus kurang dari 10 μm . Terdapat pula kuarsa dengan komposisi kimia SiO_2 yang memiliki bentuk *anhedral-subhedral* berwarna putih serta ukuran mineral *quartz* yang nampak adalah ukuran kristal halus kurang dari 10 μm . Hasil pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) berdasarkan pola difraktogram menunjukkan bahwa mineral yang terkandung pada sampel *Ni-matte slag* adalah forsterit (Mg_2SiO_4) dengan persentase sebesar 58,1%, enstatite (MgSiO_3) sebanyak 38,3%, dan magnesioferrite 3,5%.



Gambar 1. Fotomikrografi sampel *nickel matte slag* yang menunjukkan mineral olivin (Olv) dan mineral kuarsa (Qz)



Gambar 2. Hasil analisis XRD sampel awal

Hasil analisis kimia sampel awal *nickel matte slag* menggunakan XRF dan AAS dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Sampel *nickel matte slag* mengandung silika (SiO_2) sebesar 37,48%. Sampel awal juga mengandung besi (30,15%) dan magnesia (23,70%) dengan rasio S/M yaitu 1,58. Silika (SiO_2) memiliki pengaruh kuat terhadap nikel (Ni) yang diperoleh dalam sampel dimana semakin tinggi silika (SiO_2) maka kadar nikel (Ni) semakin rendah. Kadar magnesia (MgO) pada sampel berpengaruh terhadap laju pelindian karena

dapat meningkatkan konsumsi asam yang digunakan saat melakukan proses ekstraksi. Semenetera itu, hasil analisis kimia sampel nickel matte slag menggunakan AAS menunjukkan bahwa sampel mengandung 20,09% magnesium dan 24,93% besi.

Tabel 1. Hasil analisis XRF sampel awal

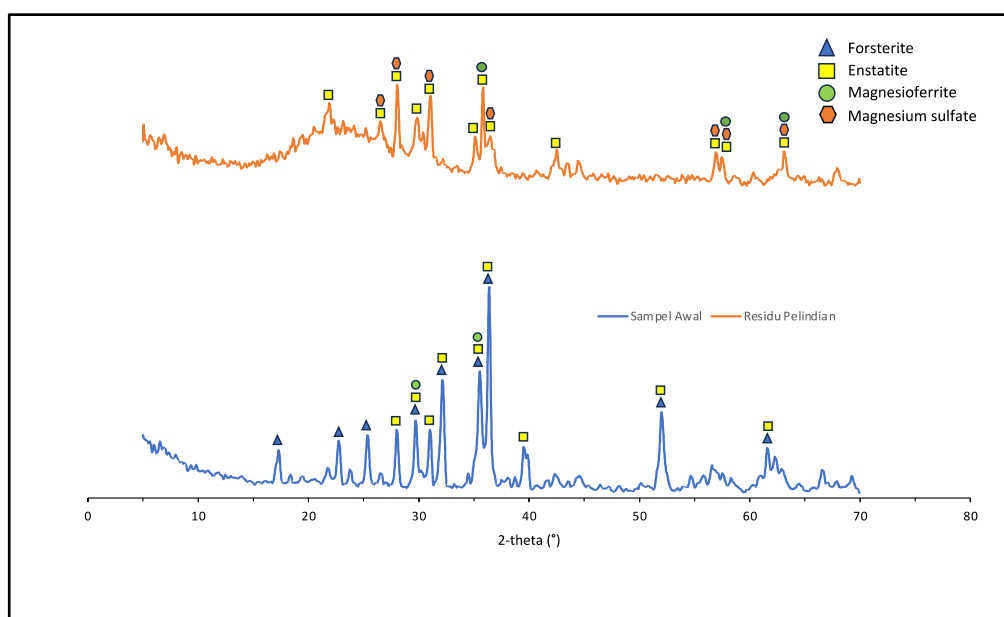
Unsur	SiO ₂	Fe	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	Ni	CaO
Kadar (%)	37,48	30,15	23,70	2,72	1,92	0,76	0,55	0,28

Tabel 2. Hasil analisis AAS sampel awal

Unsur	Mg	Fe
(mg/Kg = ppm)	200904.91	249389.69
Kadar (%)	20,090491	24,938969

Analisis Residu Pelindian

Analisis residu pelindian dilakukan untuk mengetahui mineral-mineral yang terdapat pada residu hasil pelindian. Residu yang dianalisis merupakan hasil pemisahan dengan larutan kaya yang menghasilkan laju ekstraksi magnesium dan besi tinggi yaitu residu pelindian pada variable waktu pelindian selama 120 menit, dengan suhu 90° C, dan konsentrasi pelarut H₂SO₄ 6 M. Hasil analisis menunjukkan bahwa komposisi mineral yang terkandung dalam residu pelindian berbeda dengan komposisi mineral dalam sampel awal. Perbandingan pola difraktogram sampel awal dan residu dengan laju ekstraksi magnesium dan besi yang tinggi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan pola difraktogram sampel awal dan residu pelindian dari *nickel matte slag* dengan menggunakan pelarut H₂SO₄

Gambar 3 menunjukkan residu pelindian mengandung mineral forsterit, enstatit, magnesium sulfat, dan magnesioferrit. Pola difraktogram tersebut memperlihatkan bahwa terjadi perubahan intensitas dan pergeseran puncak refleksi. Hal ini disebabkan karena mineral tersebut mengalami disolusi saat proses pelindian berlangsung. Fan and Gerson (2013) mengatakan bahwa perubahan intensitas pada suatu atau beberapa *peak* setelah proses pelindian disebabkan oleh disolusi mineral selama proses pelindian berlangsung.

Perbandingan *peak* mineral antar sampel awal dan residu hasil pelindian pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sebahagian *peak* tidak mengalami perubahan intensitas. Hal dapat ditunjukkan pada puncak-puncak difraktogram mineral enstatit dan magnesioferrit baik pada sampel awal maupun pada residu. Dengan demikian, dapat diinterpretasikan bahwa mineral tersebut tidak mengalami disolusi pada selama pelindian. Sebaliknya, *peak-peak* olivin yang sebelumnya muncul pada sampel Ni-matte slag, namun tidak terlihat pada difraktogram residu. Namun terdapat *peak-peak* baru yang muncul. *Peak-peak* tersebut diinterpretasi merupakan *peak-peak* dari mineral magnesium sulfat. Kehadiran silika amorf ditandai dengan bentuk difraktogram cembung antara sudut $15^\circ - 30^\circ$ 2θ . Reaksi pembentukan fasa MgSO_4 dan silika amorf terjadi menurut persamaan reaksi 1 sebagai berikut:



Pengaruh Konsentrasi H_2SO_4 Terhadap Laju Pelindian Mg dan Fe

Laju pelindian magnesium dan besi dihitung menggunakan rumus efisiensi pelindian (Dong *et al.*, 2023) menurut persamaan 2 berikut.

$$\eta = \frac{c_i \times v}{m \times W_i} \times 100 \quad (2)$$

Dimana:

η = Laju pelindian (%)

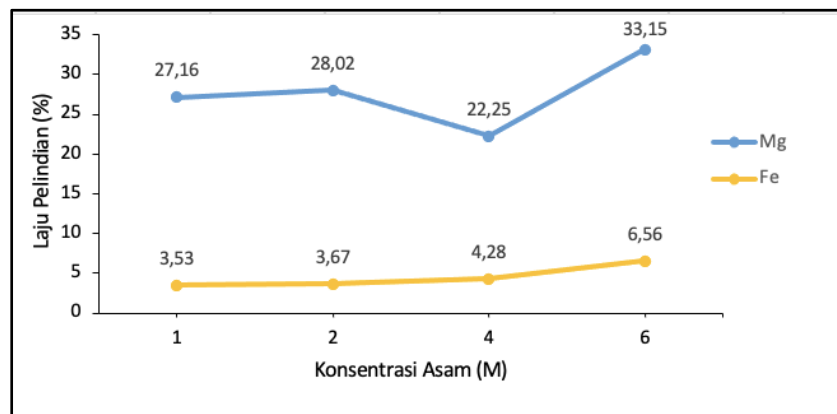
c_i = Konsentrasi logam (mg/L) dalam pregnant leach solution (PLS)

v = Volume PLS (L)

m = Massa sampel (Kg)

W_i = Kadar logam (mg/Kg)

Laju pelindian Mg dan Fe berdasarkan pengaruh konsentrasi H_2SO_4 dihitung menggunakan persamaan (2) diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.

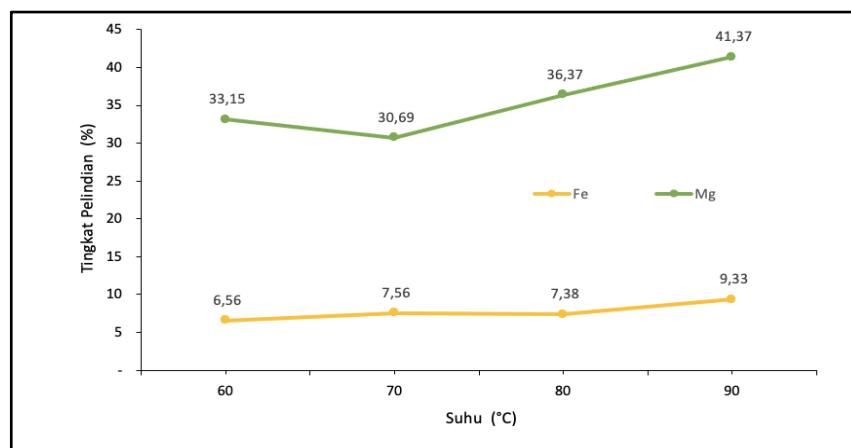


Gambar 4. Grafik perbandingan tingkat pelindian Mg dan Fe berdasarkan konsentrasi asam (M) menggunakan pelarut H_2SO_4 pada kondisi suhu 60°C dan waktu 30 menit

Grafik perbandingan tingkat pelindian Mg dan Fe berdasarkan konsentrasi asam (M) menggunakan pelarut H_2SO_4 pada kondisi suhu 60°C dan waktu 30 menit (Gambar 4) menunjukkan bahwa tingkat pelindian maksimum Mg dan Fe yaitu pada konsentrasi H_2SO_4 6 M dengan laju pelindian Mg sebesar 33,15 % dan Fe sebesar 6,56%.

Pengaruh Suhu Terhadap Laju Pelindian Mg dan Fe

Laju pelindian Mg dan Fe berdasarkan pengaruh suhu dan waktu pelindian dihitung menggunakan persamaan (2) diperoleh hasil seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik perbandingan tingkat pelindian Mg dan Fe berdasarkan suhu ($^\circ\text{C}$) menggunakan pelarut asam sulfat (H_2SO_4).

Grafik perbandingan tingkat pelindian Mg dan Fe berdasarkan suhu dan waktu pelindian menggunakan pelarut asam sulfat H_2SO_4 (Gambar 5) menunjukkan bahwa tingkat pelindian maksimum Mg dan Fe yaitu pada kondisi waktu pelindian 120 menit dan suhu 90°C yang memperoleh tingkat pelindian Mg sebesar 41,37% dan Fe sebesar 9,33%.

KESIMPULAN

1. Hasil analisis mikroskopis yang dilakukan pada sampel awal *nickel matte slag* menunjukkan bahwa mineral-mineral penyusun terdiri dari olivin dan magnesioferrit. Berdasarkan hasil analisis XRD, *nickel matte slag* mengandung mineral ferroan forsterit dengan persentase 58,1%, ferroan enstatite 38,3%, dan magnesioferrit 3,5%. Hasil analisis kimia terhadap sampel *nickel matte slag* menggunakan metode XRF menunjukkan kandungan silika (SiO_2) sebesar 37,48%; Fe sebesar 30,15% dan MgO sebesar 23,70% dengan rasio S/M sebesar 1,58. Sementara itu, analisis AAS menunjukkan *nickel matte slag* mengandung Mg sebesar 20,09% dan Fe sebesar 24,93%.
2. Komposisi mineral residu hasil pelindian *nickel matte slag* yang ditentukan dengan metode XRD menunjukkan bahwa suhu, waktu, dan konsentrasi asam sulfat (H_2SO_4) sebagai variabel penelitian mempengaruhi tingkat disolusi mineral dalam *nickel matte slag* selama proses pelindian. Mineral enstatit dan magnesioferrit tidak mengalami disolusi selama proses pelindian, sebaliknya olivin terdisolusi selama pelindian sehingga menyebabkan pembentukan magnesium sulfat dan silika amorf.
3. Hasil percobaan pelindian memperlihatkan bahwa semakin meningkat suhu, waktu, dan konsentrasi dalam proses pelindian maka tingkat pelindian Mg dan Fe juga semakin meningkat. Tingkat pelindian maksimum Mg sebesar 41,37% lebih tinggi dari Fe yakni 9,33% yang diperoleh pada konsentrasi H_2SO_4 6 M, suhu pelindian 90°C , dan waktu pelindian 120 menit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Vale Indonesia Tbk yang telah memberikan izin untuk mengambil sampel penelitian. Terima kasih juga disampaikan kepada Ketua Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang telah memberi dukungan dalam bentuk fasilitas dan legalitas terhadap penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Akmal Saputno yang telah membantu dalam pengambilan data dan analisis XRD.

REFERENSI

- Al-Khirbash, S., 2015. Genesis and Mineralogical Classification of Ni-Laterites, Oman Mountains, *Ore Geology Reviews*, 65, p. 199–212.
- Arif, I., 2018. Nikel Indonesia. PT Gramedia, Jakarta, p. 246
- Ayanda, O.S., Oyebamiji, A.K., & Oluwole, O.O., 2017. Extraction of Magnesium from Calcined Dolomite Ore using Hydrochloric Acid Leaching. *Nigerian Journal of Technology*, 36(3), 885-893.

- Buxton, M.W., Xu, Z., & Shaw, J.M., 1996. Factors affecting the rate of magnesium extraction from serpentine in sulfuric acid. *Hydrometallurgy*, 42(2), 249-266.
- Chen, W., Feng, Y., Han, X., & Liu, X., 2018. Extraction of magnesium from serpentine mineral by a mixed acid leaching method. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 36(5), 93-500.
- Chou, C.K., Lai, J.Y., & Chen, Y.W., 2012. Extraction of magnesium from Taiwan's tailing ores by pressure acid leaching. *Advanced Materials Research*, 455-456, 1639-1642.
- Dong, B., Tian, Q., Xu, Z., Guo, X., Wang, Q., & Li, D. 2023. The effect of pre-roasting on atmospheric sulfuric acid leaching of saprolitic laterites. *Hydrometallurgy*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106063>
- Fan, R., and Gerson, A., R., 2013, Mineralogical Characterization of Indonesia Laterites Prior to and post Atmospheric Leaching, *Hydrometallurgy*, 134-135, 102-109.
- Gupta, C. K., & Mukherjee, T. K. 2011. *Hydrometallurgy in Extraction Processes*, Volume I. CRC Press.
- Jain, S.K. & Agrawal, A., 2013. Extraction of magnesium from Indian coals by acid leaching method. *International Journal of Mineral Processing*, 118, 29-33.
- Lu, X., Zhao, L., Wang, Z., & Wang, M., 2018. Extraction of Magnesium from Nickel Laterite Ore using Dilute Sulfuric Acid Leaching under Atmospheric Pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(5), 1095-1104.
- Ma, Y., Zhang, S., Liu, X., & Wang, C. 2020. Extraction of magnesium from nickel slag using sulfuric acid leaching under moderate conditions. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 59(2), 141-147.
- Pei, C., Zeng, W., Liu, L., & Wu, W., 2019. Selective extraction of magnesium from ferronickel slag by sulfuric acid leaching under atmospheric pressure. *Separation and Purification Technology*, 210, 105-111.
- Wang, J., Zhang, Y., Sun, F., & Li, X., 2018. Solvent Extraction Separation of Magnesium(II) from Nickel(II) Using Di-(2-ethylhexyl) Phosphoric Acid. *Separation Science and Technology*, 53(12), 1814-1821.
- Zhang, H., Xu, Y., Xu, B., & Zhang, Y. 2018. Extraction of magnesium from magnesium slag using sulfuric acid as a leaching agent. *J. of Chem. and Pharm. Res.*, 10(9), 33-40.