



KINETIKA DAN MEKANISME PELINDIAN NIKEL DARI BIJIH LIMONIT : PENGARUH WAKTU DAN TEMPERATUR

Eni Febriana^{a,*}, Agung Tristiyan^b, Wahyu Mayangsari^a, Agus Budi Prasetyo^a

^aPusat Penelitian Metalurgi dan Material-LIPI

Gedung 470 Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15310

^bTeknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Jenderal Sudirman Km 3, Cilegon, Banten, Indonesia 42435

*E-mail: astrinit@gmail.com

Masuk Tanggal : 23-01-2018, revisi tanggal : 19-07-2018, diterima untuk diterbitkan tanggal 29-08-2018

Intisari

Pelindian dengan reagen pelindi asam sulfat untuk mengekstraksi nikel dari bijih limonit Halmahera telah diteliti. Karakterisasi bijih dilakukan dengan menggunakan XRD (*x-ray diffraction*), XRF (*x-ray fluorescence*), dan SEM (*scanning electron microscopy*). Percobaan pelindian dilakukan pada tekanan atmosfer. Kinetika pelindian dipelajari dengan mengikuti model *shrinking core*. Pengaruh temperatur dan waktu yang dipelajari yaitu pada temperatur 30, 50, dan 90 °C dengan waktu pelindian hingga 480 menit, dengan konsentrasi H₂SO₄ sebesar 1 M dan rasio *o/l* (*ore/liquid*) 2,5%. Nilai % ekstraksi Ni maksimum diperoleh sebesar 95,9% dengan pelindian selama 480 menit pada temperatur 90 °C menggunakan bijih nikel limonit berukuran -150+200 mesh. Hasil analisis menunjukkan bahwa laju pelindian Ni secara umum dikendalikan oleh difusi melalui lapisan produk dengan energi aktivasi untuk pelindian sebesar 78,0 kJ/mol. Mekanisme pelindian bijih limonit diidentifikasi dari grafik XRD residu hasil pelindian. Semakin tinggi temperatur dan semakin lama waktu pelindian meningkatkan % ekstraksi Ni yang diikuti dengan meningkatnya intensitas puncak kuarsa pada sudut $2\theta = 26^\circ$.

Kata Kunci : Nikel, bijih limonit halmahera, kinetika *shrinking core*

Abstract

Leaching by using sulfuric acid for nickel extraction of Halmahera limonite ore was investigated. Characterization of the ore was conducted by XRD (x-ray diffraction), XRF (x-ray fluorescence), and SEM (scanning electron microscopy). The leaching was carried out under atmospheric pressure. Kinetic of leaching was studied by following the shrinking core model. The effect of temperatur and time were studied at various temperatures of 30, 50, and 90 °C with leaching time up to 480 minutes. A maximum 95% Ni extraction value was obtained for 480 min leaching at 90 °C from -150+200 mesh of limonitic nickel ore, with a concentration of H₂SO₄ of 1 M and a 2.5% ore / liquid ratio. The results show that the leaching rate of Ni is generally controlled by diffusion through the product layer with activation energy for the leaching of 78.0 kJ/mol. The leaching mechanism of limonite ores was identified from the result of residual leaching XRD graph. With increasing temperatur and the longer of leaching time, % extraction of Ni was increased. This condition followed by increasing of the quartz peak's intensity at $2\theta = 26^\circ$.

Keywords: Nickel, halmahera limonite ore, *shrinking core kinetic*

1. PENDAHULUAN

Mayoritas sumber nikel dunia berupa bijih laterit yang keberadaannya meliputi hampir 70% dari total cadangan nikel dunia [1]. Dari sekian jumlah tersebut, ~70%-nya merupakan jenis bijih limonit yang kadar nikel dan magnesiumnya rendah namun mempunyai kadar Fe yang tinggi [2]. Bijih laterit merupakan bijih yang struktur

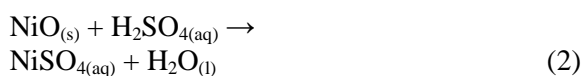
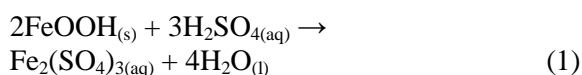
mineraloginya kompleks, kadar nikelnya rendah [3], dan biaya pengolahannya tinggi, baik melalui peleburan konvensional maupun dengan *autoclave* bertekanan tinggi [4].

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan nikel akhir-akhir ini, diperlukan metode pengolahan nikel laterit yang lebih ekonomis. Untuk bijih nikel laterit jenis limonit lebih cocok diolah secara hidrometalurgi [5]-[6], seperti pelindian

pada tekanan atmosfer [4]. Proses pelindian atmosferik dipilih karena membutuhkan biaya investasi dan mempunyai resiko teknis yang rendah, memberikan *recovery* logam-logam bernilai yang tinggi [7] seperti Ni dan Co [8] serta memerlukan energi rendah [8]-[11].

Pelindian dengan berbagai asam seperti asam sulfat, asam klorida dan asam nitrat pada tekanan atmosfer telah dilakukan [4],[7],[8],[10]-[23]. Pada penelitian ini, asam sulfat digunakan untuk pelindian atmosferik bijih limonit. Teir *et al*, 2007 [16] menyatakan bahwa untuk pelindian bijih saprolit, asam sulfat merupakan asam yang paling efisien dibandingkan dengan jenis asam yang lain. Asam sulfat 10% (v/v) cukup korosif untuk mengubah struktur lizardit dan mendekomposisi silikat sehingga mampu melarutkan nikel [10]. Selain itu temperatur pelindian merupakan faktor yang berpengaruh secara signifikan dalam proses pelindian [14], [23]. Temperatur yang optimum untuk pelindian dengan menggunakan asam sulfat pada tekanan atmosfer adalah pada 95 °C untuk nikel laterit jenis limonit [14] maupun jenis saprolit [23] dengan % ekstraksi nikel sekitar 80%.

Kinetika dan mekanisme reaksi merupakan faktor yang penting untuk dipelajari agar dapat mengontrol proses yang terjadi [6]. Salah satu faktor yang mempengaruhi mekanisme reaksi adalah mineralogi bijih nikel yang digunakan. Untuk bijih nikel limonit yang mempunyai fase mayor goethit, mekanisme reaksi yang umum terjadi pada proses pelindian dengan menggunakan H₂SO₄ ditunjukkan pada reaksi (1), sedangkan nikel yang diasumsikan dalam bentuk oksida akan terlarut sesuai dengan reaksi (2) [24].



Proses pelindian dengan menggunakan pelarut H₂SO₄ merupakan sistem reaksi heterogen (*solid-liquid*). Laju reaksi pada umumnya dikendalikan oleh salah satu tahapan berikut: difusi melalui lapisan pelarut, difusi melalui permukaan produk reaksi, atau reaksi kimia pada permukaan partikel yang bereaksi [25]-[26]. Proses yang terjadi dikendalikan oleh tahapan yang paling lambat, apakah reaksi kimia pada permukaan partikel, difusi melalui lapisan produk, atau kombinasi keduanya [17]. Kinetika reaksi pelindian untuk partikel pada umumnya dapat ditinjau dengan menentukan laju pengendali reaksi menggunakan dua persamaan *shrinking core model* [6],[15],

[27]-[29] yang dinyatakan dengan dua persamaan sebagai berikut [10]:

$$1 - (1 - x)^{1/3} = k_r t \quad (3)$$

$$1 - \frac{2}{3}x - (1 - x)^{2/3} = k_{dif} t \quad (4)$$

Dengan x adalah fraksi yang bereaksi, k adalah konstanta laju reaksi, dan t adalah waktu pelindian. Persamaan (3) mengasumsikan bahwa pengendali laju reaksi adalah reaksi kimia yang terjadi pada permukaan partikel, sedangkan persamaan (4) mengasumsikan bahwa pengendali proses pelindian adalah difusi melalui lapisan produk [6],[10]. k_r dan k_{dif} menandakan konstanta laju reaksi untuk proses pelindian yang berturut-turut dikendalikan oleh reaksi kimia dan difusi. Konstanta laju reaksi dapat digunakan untuk menentukan tingkat pengaruh temperatur terhadap reaksi pelindian dengan menggunakan persamaan Arrhenius (5) sebagai berikut:

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (5)$$

dengan R = konstanta gas ideal (8,314 J/mol.K), T = temperatur (K) dan E = energi aktivasi (kJ/mol) [10],[15]. Dengan memplotkan konstanta laju reaksi untuk setiap percobaan pada berbagai temperatur terhadap (1/T), dapat ditentukan energi aktivasi untuk reaksi tersebut.

Kinetika pelindian laterit dalam berbagai kondisi telah dipelajari oleh beberapa peneliti sebelumnya. Pelindian nikel dengan asam sulfat pada tekanan tinggi dikendalikan oleh difusi pelarut melalui pori-pori limonit dengan mengikuti *grain model* [30]. Proses pelindian bijih nikel laterit jenis saprolit dapat dikendalikan oleh difusi [6],[28] maupun reaksi kimia [10], [23]. Untuk bijih nikel laterit berkadar rendah dengan kandungan silika tinggi, proses pelindian dapat dikendalikan oleh reaksi kimia [15] atau kombinasi reaksi dan difusi [27], sedangkan jenis limonit terutama limonit terdehidroksilasi, proses pelindian lebih dikendalikan oleh difusi [29],[31].

Pada penelitian ini, asam sulfat digunakan untuk pelindian atmosferik bijih limonit. Untuk dapat mengontrol proses pelindian, maka perlu untuk mengetahui kinetika dan mekanisme reaksinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu dan temperatur reaksi ditinjau dari kinetika pelindian bijih limonit dengan menggunakan pelarut asam sulfat pada tekanan atmosfer sehingga dapat diketahui keefektifan asam sulfat untuk pelindian bijih nikel limonit. Mekanisme pelindian diinterpretasikan dari analisis terhadap data mineralogi hasil pengukuran XRD terhadap residu hasil pelindian.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1 Bahan dan Analisis Material

Bijih laterit dari Halmahera, Maluku Utara, Indonesia mula-mula dikeringkan terlebih dahulu menggunakan oven yang diatur pada temperatur 110 °C selama 24 jam kemudian digerus dan diayak. Ukuran butiran yang digunakan dalam serangkaian proses percobaan adalah bijih yang lolos ayakan 150 mesh dan tertahan pada fraksi ayakan 200 mesh. Pemilihan penggunaan ukuran sampel ini berdasarkan pada fraksi ukuran terbesar dari hasil *sieve analysis* yang telah dilakukan. Sampling bijih dilakukan dengan menggunakan metode *coning and quartering*. Analisis kimia dan mineralogi sampel bijih laterit dilakukan dengan menggunakan XRF (*x-ray fluorescence*) dan XRD (*x-ray diffraction*) Shimadzu MAXima XRD-7000 dengan radiasi Cu K α ($\lambda = 1,54$). Struktur morfologi dianalisis menggunakan SEM-EDS (*scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy*) JEOL JSM 6390 A. Penentuan kadar Ni di dalam sampel dilakukan dengan menggunakan AAS (*atomic absorption spectroscopy*) Jena.

2.2 Percobaan Pelindian

Pelindian dilakukan di dalam reaktor labu berleher tiga yang dilengkapi penutup dan kondenser untuk mengembunkan kembali pelarut yang menguap. Bijih limonit yang telah kering dan dihaluskan dimasukkan ke dalam labu reaktor, kemudian ke dalam labu tersebut dimasukkan sejumlah tertentu larutan H₂SO₄ dengan konsentrasi yang telah ditentukan. Labu reaktor diletakkan di atas *hot plate*, diatur temperatur dan kecepatan pengadukannya. Temperatur reaksi diamati dari termometer yang dipasang pada salah satu leher labu dan dicelupkan ke dalam *slurry*. Untuk memastikan *slurry* tercampur homogen dan tidak mengendap, ke dalam labu juga dimasukkan batang magnet pengaduk berlapis teflon. Setelah proses pelindian selesai, *slurry* disaring, dicuci dengan aquademin. Filtrat dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan fraksi logam yang terlarut, residu dikeringkan dan dianalisis dengan XRD untuk analisis mekanisme pelindian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Mineralogi Bijih Limonit

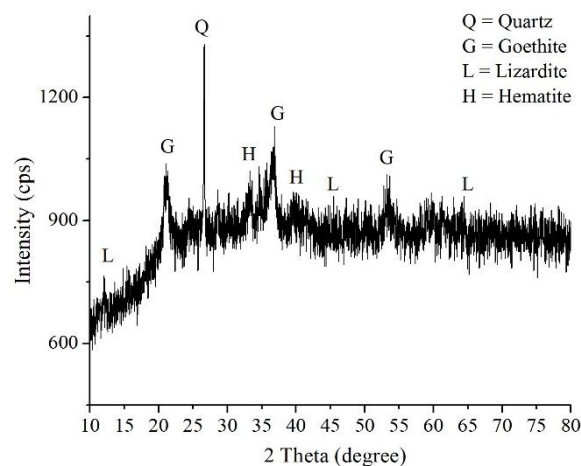
Analisis kimia unsur-unsur yang terkandung di dalam bijih dari hasil pengukuran menggunakan XRF ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi bijih nikel limonit

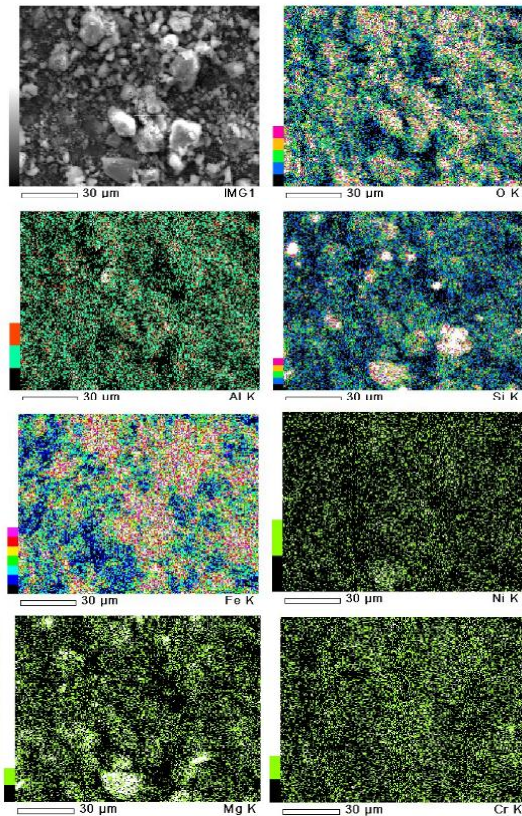
Komposisi	Kadar (%)
Besi oksida	69,6
Nikel oksida	1,42
SiO ₂	14,8
Al ₂ O ₃	4,63
MgO	3,04

Komposisi bijih dengan oksida besi yang tinggi dan magnesium oksida rendah menunjukkan bahwa bijih laterit yang digunakan adalah jenis limonit [27]. Grafik XRD bijih limonit ditunjukkan pada Gambar 1. Di samping goethite (FeO(OH)), dan kuarsa (SiO₂) sebagai mineral utama penyusun limonit, juga terdeteksi adanya hematit (Fe₂O₃), dan lizardit (Mg₃(Si₂O₅)(OH)₄). Sesuai dengan hasil XRF dan XRD, dapat dikatakan bahwa di dalam bijih limonit besi oksida terdapat dalam struktur goethite dan hematit, sedangkan unsur Si tersebar dalam bentuk kuarsa ataupun lizardit. Goethite merupakan mineral yang dominan pada sebagian besar laterit jenis limonit [32].

Struktur morfologi dari data SEM-EDS dari bijih limonit mengkonfirmasi adanya senyawa-senyawa yang ditunjukkan dari analisis XRD tersebut. Pola persebaran unsur hasil *mapping* dengan SEM-EDS ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Pola grafik XRD bijih limonit dari Halmahera yang digunakan pada studi ini

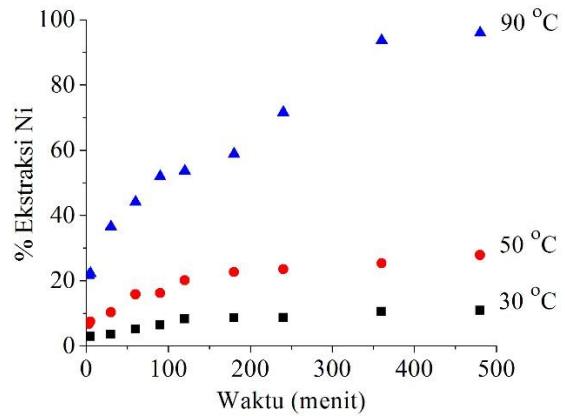


Gambar 2. Hasil *mapping* unsur penyusun limonit dengan menggunakan pencitraan SEM-EDS

Distribusi elemen-elemen penyusun bijih limonit pada Gambar 2 menunjukkan bahwa Fe dan O mendominasi struktur morfologi sampel baik dalam bentuk goethite maupun hematit sesuai dengan hasil analisis XRD. Mg, Si, dan O terdapat sebagai senyawa yang cukup terpisah dari besi oksida dengan membentuk fasa lizardit ($Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$), sementara Si dan O ada dalam bentuk mineral kuarsa dengan kristalinitas yang tinggi, diindikasikan dengan terdeteksinya unsur Si pada hasil *mapping* SEM dan puncak yang tajam pada grafik XRD. Unsur Ni yang tersebar secara merata terdapat dalam asosiasi dengan Fe dalam bentuk isomorfisme dari goethite [14]. Adapun Ni yang berikatan dengan Mg, Si, dan O berisomorfisme di dalam lizardit.

3.2 Pelindian Atmosferik Bijih Limonit dalam Media Asam Sulfat

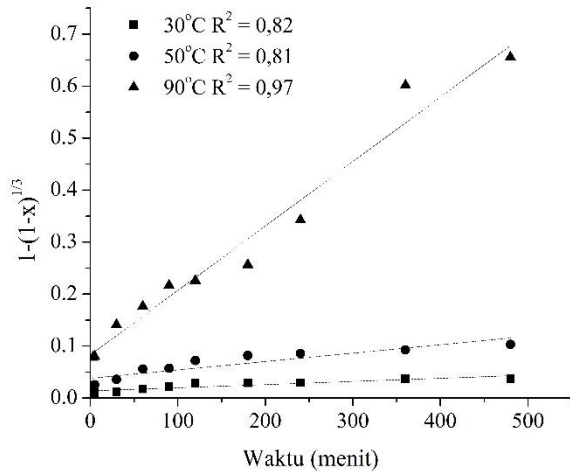
Pengaruh temperatur dan waktu pada pelindian Ni dari bijih limonit dipelajari selama 480 menit pada temperatur 30, 50, dan 90 °C dengan kecepatan pengadukan 400 rpm, *o/l* (*ore/liquid*) 2,5%, konsentrasi pelarut H_2SO_4 1 M. Besarnya % ekstraksi Ni pada berbagai temperatur pelindian dapat dilihat dari grafik pada Gambar 3.



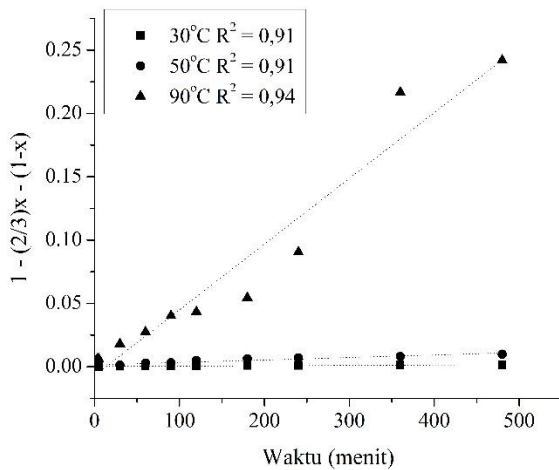
Gambar 3. Pengaruh temperatur pelindian terhadap % ekstraksi Ni selama 480 menit pelindian

Temperatur mempunyai pengaruh yang cukup besar dalam proses ekstraksi logam [10]. Dengan menjaga kondisi operasi lainnya tetap konstan, logam Ni yang terlarut semakin meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pada rentang waktu reaksi yang sama. Dari grafik pada Gambar 3 tersebut, terlihat bahwa pada temperatur 30 °C, ekstraksi Ni hanya mencapai 10,8% setelah 480 menit waktu pelindian. Kenaikan temperatur pelindian hingga 50 °C hanya mampu meningkatkan % ekstraksi Ni tiga kali lipat dibanding pelindian pada temperatur 30 °C dengan nilai maksimum 27,8%. Kenaikan yang cukup signifikan diperoleh pada kondisi pelindian dengan temperatur 90 °C. Sebanyak 95,9% Ni dapat diekstrak pada kondisi pelindian ini.

Untuk lebih detail mengenai proses yang terjadi pada pelindian bijih limonit ini perlu ditinjau mengenai aspek kinetika reaksinya. Analisis kinetika dilakukan berdasarkan data persentase nikel yang terlarut selama proses pelindian dengan asumsi reaksi berlangsung sesuai dengan mekanisme pada persamaan (2). Persamaan (3) dan (4) diaplikasikan terhadap data hasil percobaan sehingga diperoleh nilai koefisien korelasi untuk masing-masing temperatur yang hasilnya disajikan pada Gambar 4 untuk proses yang dikendalikan oleh reaksi kimia dan Gambar 5 untuk proses yang dikendalikan oleh difusi. Nilai-nilai konstanta laju reaksi dan koefisien korelasi dari data percobaan diringkas pada Tabel 2.



Gambar 4. Grafik $1-(1-x)^{1/3}$ terhadap waktu untuk pelindian limonit pada berbagai temperatur



Gambar 5. Grafik $1-(2/3)x-(1-x)$ terhadap waktu untuk pelindian limonit pada berbagai temperatur

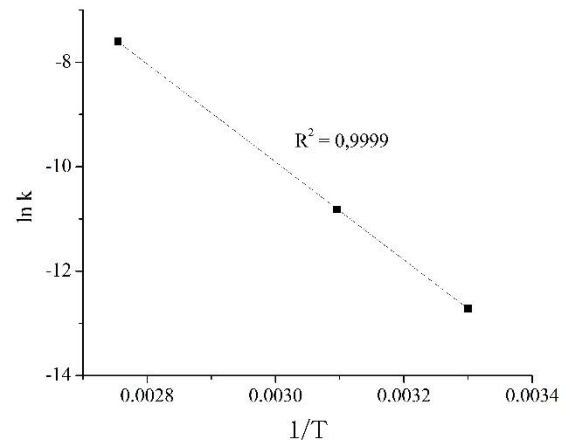
Tabel 2. Konstanta laju reaksi dan koefisien korelasi

Temperatur (°C)	Konstanta laju reaksi (/mnt)		Koefisien korelasi (R ²)	
	k_{dif}	k_r	difusi	reaksi
30	0,000006	0,00006	0,91	0,82
50	0,00002	0,0002	0,91	0,81
90	0,0005	0,0012	0,94	0,97

Berdasarkan nilai koefisien korelasi dari data yang diperoleh, secara keseluruhan reaksi pelindian bijih limonit dikendalikan oleh difusi melalui lapisan produk. Nilai konstanta laju reaksi pada Tabel 2 yang menunjukkan bahwa nilai k_r lebih tinggi dibandingkan k_{dif} . Reaksi kimia berjalan sangat cepat, membentuk lapisan berpori pada permukaan partikel yang mana asam sulfat harus melewatinya untuk mencapai inti partikel yang belum bereaksi [28]. Dengan demikian difusi menjadi pengendali proses pelindian. Kondisi yang sedikit berbeda terjadi pada pelindian pada temperatur 90 °C. Pada

Gambar 3 terlihat bahwa % ekstraksi Ni cenderung terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu hingga mencapai kondisi maksimumnya, ditandai dengan nilai koefisien korelasi pada temperatur 90 °C hampir berimbang untuk kondisi yang dipengaruhi difusi maupun reaksi.

Data konstanta laju reaksi pada Tabel 2 diplotkan ke persamaan (5). Hasilnya ditampilkan sebagai grafik hubungan antara $1/T$ dengan $\ln k$ pada Gambar 6.

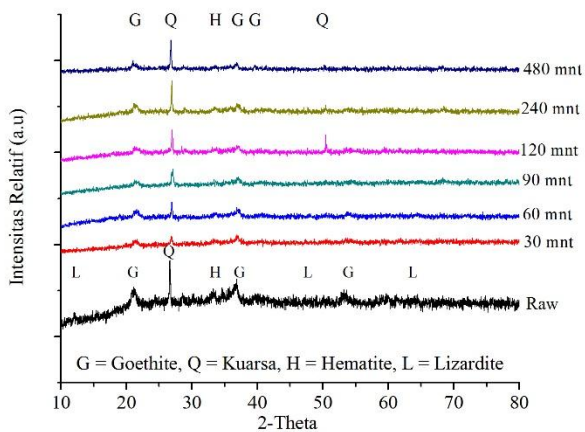


Gambar 6. Arrhenius plot untuk pelindian Ni sesuai data pada Tabel 2

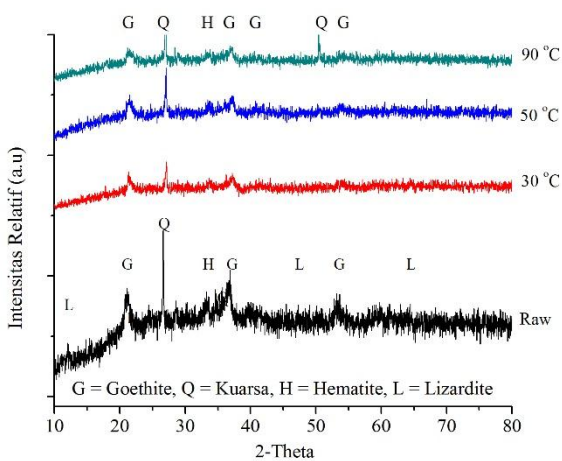
Dari plot grafik pada Gambar 6 diperoleh harga energi aktivasi sebesar 78,02 kJ/mol (18,6 kkal/mol). Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Tevfik Agacayak dan Veysel Zedef [29] bahwa rekasi pelindian laterit dengan asam sulfat dikendalikan oleh difusi dengan energi aktivasi sebesar 68,7 kJ/mol. Kinetika ekstraksi Ni, Co, dan Fe dari mineral berbasis goethite juga dilakukan oleh Kursunoglu dan Kaya [15] dengan energi aktivasi sebesar 51,6 kJ/mol pada rentang temperatur 30-90 °C.

3.3 Mekanisme Pelindian Bijih Limonit

Mekanisme pelindian bijih limonit dipelajari berdasarkan pola difraksi residu pelindian setiap waktu dan temperatur. Grafik hasil XRD tersebut dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8. Dari pola XRD pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa pada awal proses pelindian, fasa lizardite pada sudut 2θ sudah tidak terdeteksi sejak 30 menit pelindian karena fasa ini mudah larut dalam suasana asam [10],[21],[27].

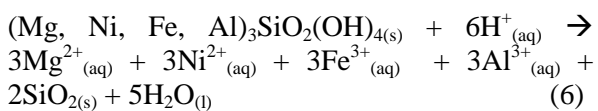


Gambar 7. Pola XRD residu hasil pelindian pada berbagai waktu pada temperatur 90 °C



Gambar 8. Pola XRD residu hasil pelindian selama 120 menit pada berbagai temperatur

Ekstraksi nikel dari fasa lizardit di dalam pelarut asam dapat terjadi dengan mengikuti persamaan reaksi (6) [12] :



Kemudian pada residu yang dihasilkan setelah 30 menit masih tampak adanya puncak goethite sebagai mineral berbasis Fe maupun yang di dalamnya terdapat isomorfisme Ni. Reaksi pelarutan besi dan nikel di dalam goethite kemungkinan mengikuti reaksi pada persamaan (1) dan (2) sehingga dalam larutan hasil pelindian terurai dalam bentuk $NiSO_4$ dan $Fe_2(SO_4)_3$. Fasa goethite ini masih terdeteksi hingga 480 menit pelindian dengan intensitas yang semakin kecil. Perilaku pelindian sangat tergantung pada mineralogi bijih, komposisi kimia, dan kondisi proses. Beberapa peneliti [13],[27],[33] melaporkan bahwa pelarutan Ni berlangsung lebih cepat pada bijih yang didominasi oleh

lempung reaktif (misalnya, smektitite dan saprolite) dibandingkan dengan bijih yang kaya oksida seperti goethite. Dalam bijih goethite di mana Ni tergabung dalam kisi mineral berbasis Fe, pelarutan partikel goethite secara menyeluruh diperlukan agar ekstraksi Ni bisa maksimum [4], [13]. Sementara itu, seiring dengan bertambahnya waktu pelindian, terdeteksi puncak kuarsa yang semakin dominan. Hal ini jelas karena fasa kuarsa tidak larut dalam larutan pelindi asam sulfat sehingga semakin lama waktu pelindian, semakin banyak logam yang terlarut di dalam larutan pelindi, sementara silika tertinggal di dalam residu.

Pengaruh temperatur terhadap mekanisme pelindian bijih limonit dapat dipelajari dari grafik XRD pada Gambar 8. Untuk waktu yang sama, temperatur yang lebih tinggi memudahkan pelarutan fasa lizardite dan goethite. Fasa lizardite larut pada semua variasi temperatur pelindian dari 30 hingga 90 °C, sementara fasa goethite mengalami penurunan intensitas seiring dengan meningkatnya temperatur pelindian. Sebaliknya, terjadi peningkatan intensitas kuarsa pada residu yang dihasilkan dari pelindian. Meningkatnya intensitas fasa kuarsa ini sebagai akibat dari semakin banyaknya logam yang terlarut selama pelindian. Hasil ini sesuai dengan apa yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu profil % ekstraksi Ni terhadap waktu pada Gambar 3.

4. KESIMPULAN

Semakin tinggi temperatur pelindian, % ekstraksi Ni yang diperoleh juga semakin tinggi. Kenaikan temperatur hingga 50 °C dan 90 °C menyebabkan kenaikan % ekstraksi Ni masing-masing tiga dan sembilan kali lipat dari % ekstraksi Ni pada temperatur 30 °C untuk waktu pelindian hingga 180 menit.

Berdasarkan perhitungan kinetiknya, reaksi pelindian bijih limonit dari Halmahera dalam larutan asam sulfat pada tekanan atmosfer dikendalikan oleh difusi melalui lapisan produk pada permukaan partikel.

Ni dalam fasa lizardit paling mudah terlarut di dalam pelindian dengan asam sulfat, diikuti dengan fasa goethit. Semakin banyak fasa logam yang terlarut ditandai dengan meningkatnya intensitas kuarsa pada residu hasil pelindian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI yang telah mendanai kegiatan penelitian ini melalui Kompetensi Inti tahun anggaran 2017.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. D. Dalvi, W. G. Bacon, dan R. C. Osborne, "The past and the future of nickel laterites," *PDAC 2004 International Conference Trade Show and Investors Exchange*, 2004, pp. 1-27.
- [2] M. G. King, "Nickel laterite technology-finally a new dawn," *JOM*, vol. 57, no. 7, pp. 35-39, 2005.
- [3] Y. V. Swamy, B. B. Kar, dan J. K. Mohanty, "Physico-chemical characterization and sulphatization roasting of low-grade nickeliferous laterites," *Hydrometallurgy*, vol. 69, no. 1-3, pp. 89-98, 2003.
- [4] J. Maccarthy, A. Nosrati, W. Skinner, dan J. Addai-Mensah, "Acid leaching and rheological behaviour of a siliceous goethitic nickel laterite ore: Influence of particle size and temperature," *Miner. Eng.*, vol. 77, pp. 52-63, 2015.
- [5] D. Dreisinger, "Keynote address: hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 109, pp. 253-271, 2009.
- [6] C. K. Thubakgale, R. K. K. Mbaya, dan K. Kabongo, "A study of atmospheric acid leaching of a south african nickel laterite," *Miner. Eng.*, vol. 54, pp. 79-81, 2013.
- [7] L. Meng, J. Qu, Q. Guo, K. Xie, P. Zhang, dan L. Han, "Recovery of Ni, Co, Mn, and Mg from nickel laterite ores using alkaline oxidation and hydrochloric acid leaching," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 143, pp. 80-87, 2015.
- [8] R. G. McDonald dan B. I. Whittington, "Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part I. sulphuric acid technologies," *Hydrometallurgy*, vol. 91, no. 1-4, pp. 35-55, 2008.
- [9] J. Li, D. Xiong, H. Chen, R. Wang, dan Y. Liang, "Physicochemical factors affecting leaching of laterite ore in hydrochloric acid," *Hydrometallurgy*, vol. 129-130, pp. 14-18, 2012.
- [10] W. Luo, Q. Feng, L. Ou, G. Zhang, dan Y. Chen, "Kinetics of saprolitic laterite leaching by sulphuric acid at atmospheric pressure," *Miner. Eng.*, vol. 23, pp. 458-462, 2010.
- [11] R. G. McDonald dan B. I. Whittington, "Atmospheric acid leaching of nickel laterites review. Part II. chloride and biotechnologies," *Hydrometallurgy*, vol. 91, no. 1-4, pp. 56-69, 2008.
- [12] W. Astuti, T. Hirajima, K. Sasaki, dan N. Okibe, "Comparison of atmospheric citric acid leaching kinetics of nickel from different Indonesian saprolitic ores," *Hydrometallurgy*, vol. 161, pp. 138-151, 2016.
- [13] J. H. Canterford, "Leaching of some Australian nickeliferous laterites with sulphuric acid at atmospheric pressure," *Proc. Australasia Inst. Min. Metall.*, 1978, pp. 19-26.
- [14] F. Mohammadreza, N. Mohammad, dan S. S. Ziaeddin, "Nickel extraction from low grade laterite by agitation leaching at atmospheric pressure," *Int. J. Miner. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 543-548, 2014.
- [15] S. Kursunoglu dan M. Kaya, "Atmospheric pressure acid leaching of Caldag lateritic nickel ore," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 150, pp. 1-8, 2016.
- [16] S. Teir, H. Revitzer, S. Eloneva, R. Fogelholm, dan C. J. Zevenhoven, "Dissolution of natural serpentinite in mineral and organic acids," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 83, pp. 36-46, 2007.
- [17] W. Luo, Q. Feng, G. Zang, dan Y. Cheng, "Kinetics of saprolitic laterite leaching by sulphuric acid at atmospheric pressure," *Miner. Eng.*, vol. 23, pp. 458-462, 2010.
- [18] M. Z. Mubarak dan J. Lieberto, "Precipitation of Nickel Hydroxide from Simulated and Atmospheric-leach Solution of Nickel Laterite Ore," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 6, pp. 457-464, 2013.
- [19] F. Mohammadreza, N. Mohammad, dan S. S. Ziaeddin, "Nickel extraction from low grade laterite by agitation leaching at atmospheric pressure," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 543-548, 2014.
- [20] X. Guo, D. Li, K. H. Park, Q. Tian, dan Z. Wu, "Leaching behavior of metals from a limonitic nickel laterite using a sulfation-roasting-leaching process," *Hydrometallurgy*, vol. 99, no. 3-4, pp. 144-150, 2009.
- [21] B. Wang, Q. Guo, G. Wei, P. Zhang, J. Qu, dan T. Qi, "Characterization and atmospheric hydrochloric acid leaching of a limonitic laterite from Indonesia," *Hydrometallurgy*, vol. 129-130, pp. 7-13, 2012.

- [22] J. Luo, G. Li, M. Rao, Z. Peng, Y. Zhang, dan T. Jiang, "Atmospheric leaching characteristics of nickel and iron in limonitic laterite with sulfuric acid in the presence of sodium sulfite," *Miner. Eng.*, vol. 78, pp. 38-44, 2015.
- [23] J. MacCarthy, A. Nosrati, W. Skinner, dan J. Addai-Mensah, "Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore," *Hydrometallurgy*, vol. 160, pp. 26-37, 2016.
- [24] D. Georgiou dan V. Papangelakis, "Sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite: chemistry and kinetics," *Hydrometallurgy*, vol. 49, no. 1-2, pp. 23-46, 1998.
- [25] O. Levenspiel, "Heterogeneous reactions-introduction," *Chemical Reaction Engineering, second ed. Wiley, New York*, chapter 17, pp. 369-376, 1972.
- [26] E. O. Olanipekun, "Kinetics of leaching laterite," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 60, no. 1, pp. 9-14, 2000.
- [27] I. Girgin, A. Obut, dan A. Üçyildiz, "Dissolution behaviour of a Turkish lateritic nickel ore," *Miner. Eng.*, vol. 24, no. 7, pp. 603-609, 2011.
- [28] S. Stopic, B. Friederich, dan R. Fuchs, "Kinetics of sulfuric acid leaching of the serbian nickel laterite ore," *Metal. - J. Metall.*, pp. 235-244, 2002.
- [29] T. Agacayak dan V. Zedef, "Dissolution Kinetics of Lateritic Iron Ore in Sulphuric Acid Medium," *9th Int. Multidiscip. Sci. GeoConference SGEM2009*, vol. 1, 2009, pp. 397-404.
- [30] D. Georgiu dan V. G. Papangelakis, "Sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite: chemistry and kinetics," *Hydrometallurgy*, vol. 49, no. 1-2, pp. 23, 1998.
- [31] M. Landers, R. J. Gilkes, dan M. Wells, "Dissolution kinetics of dehydroxylated nickeliferous goethite from limonitic lateritic nickel ore," *Appl. Clay Sci.*, vol. 42, no. 3-4, pp. 615-624, 2009.
- [32] Q. Guo, J. Qu, T. Qi, G. Wei, dan B. Han, "Activation pretreatment of limonitic laterite ores by alkali-roasting method using sodium carbonate," *Miner. Eng.*, vol. 24, no. 8, pp. 825-832, 2011.
- [33] E. Büyükakinci dan Y. A. Topkaya, "Extraction of nickel from lateritic ores at atmospheric pressure with agitation leaching," *Hydrometallurgy*, vol. 97, no. 1-2, pp. 33-38, 2009.