

OPTIMASI EKSTRAKSI BIJIH NIKEL DENGAN METODE ATMOSPHERIC ACID LEACHING MENGGUNAKAN ASAM SULFAT (STUDI KASUS PENAMBANGAN KOLAKA UTARA)

Mutiara¹, La Ode Muh Rifki Allamsyah², Andi Aladin³, Ruslan Kalla⁴
mutiaramti24@gmail.com¹, kumisikky@gmail.com², andi.aladin@umi.ac.id³,
ruslan.kalla@umi.ac.id⁴

Universitas Muslim Indonesia

ABSTRAK

Nikel laterit kadar rendah (<1,5% Ni) kurang ekonomis diolah dengan proses pirometalurgi sehingga memerlukan teknologi hidrometalurgi, salah satunya Atmospheric Acid Leaching (AAL) menggunakan asam sulfat (H_2SO_4). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh serta menentukan kondisi optimum variasi konsentrasi H_2SO_4 , temperatur, dan waktu pelindian terhadap persen ekstraksi nikel dari bijih limonit Kolaka Utara dengan kadar awal 1,53% Ni dan 42,20% Fe. Metode penelitian menggunakan One-Factor-at-a-Time (OFAT) dengan variasi konsentrasi H_2SO_4 sebesar 1, 3, 5, dan 7 M, temperatur 50, 70, 90, 100, 110, dan 120 °C, serta waktu pelindian 60, 120, 180, dan 240 menit. Parameter tetap meliputi kecepatan pengadukan 300 rpm, rasio padat-cair (S/L) 0,2 g/cm³, ukuran partikel <200 mesh, dan pra-kalsinasi pada 550 °C selama 2 jam. Karakterisasi kadar residu dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi H_2SO_4 hingga 7 M meningkatkan persen ekstraksi nikel menjadi 92,32% karena bertambahnya ion H^+ yang berperan dalam proses pelindian. Persen ekstraksi tertinggi berdasarkan variasi temperatur diperoleh pada 100 °C, yaitu 95,86%, sedangkan peningkatan temperatur hingga 110–120 °C menurunkan ekstraksi akibat pembentukan lapisan pasivasi dan pengendapan senyawa besi. Berdasarkan variasi waktu, ekstraksi tertinggi sebesar 96,69% diperoleh pada 240 menit, namun 120 menit ditetapkan sebagai waktu optimum operasional karena telah mencapai kondisi mendekati kesetimbangan dengan persen ekstraksi 95,23%. Dengan demikian, kondisi optimum proses AAL diperoleh pada konsentrasi H_2SO_4 7 M, temperatur 100 °C, dan waktu pelindian 120 menit.

Kata Kunci: Atmospheric Acid Leaching, Asam Sulfat, Ekstraksi, Nikel Laterit, One-Factor-At-A-Time.

ABSTRACT

Low-grade nickel laterite (<1.5% Ni) is uneconomical to process by pyrometallurgical methods, making hydrometallurgical technologies such as Atmospheric Acid Leaching (AAL) using sulfuric acid (H_2SO_4) a promising alternative. This study aimed to evaluate the effects of H_2SO_4 concentration, leaching temperature, and leaching time and to determine the optimum operating conditions for nickel extraction from North Kolaka limonite ore containing 1.53% Ni and 42.20% Fe. A One-Factor-at-a-Time (OFAT) method was employed by varying the H_2SO_4 concentration (1, 3, 5, and 7 M), temperature (50, 70, 90, 100, 110, and 120 °C), and leaching time (60, 120, 180, and 240 min). Constant parameters included a stirring speed of 300 rpm, a solid-to-liquid ratio (S/L) of 0.2 g/cm³, a particle size of <200 mesh, and pre-calcination at 550 °C for 2 h. Residual nickel content was characterized using X-Ray Fluorescence (XRF). The results showed that increasing the H_2SO_4 concentration to 7 M improved nickel extraction to 92.32% due to the greater availability of H^+ ions during leaching. The highest extraction based on temperature was achieved at 100 °C, reaching 95.86%, whereas increasing the temperature to 110–120 °C reduced extraction because of iron-bearing precipitate formation and passivation layer development. The highest extraction based on leaching time was 96.69% at 240 min; however, 120 min was selected as the optimum operational time because the extraction efficiency (95.30%) had reached a near-equilibrium condition controlled by diffusion through the product layer. Therefore, the optimum AAL operating conditions were 7 M H_2SO_4 , 100 °C, and 120 min.

Keywords: Atmospheric Acid Leaching, Sulfuric Acid, Extraction, Nickel Laterite, One-Factor-At-

PENDAHULUAN

Nikel merupakan salah satu komoditas pertambangan utama di Indonesia. Secara umum, sumber daya alam yang mengandung nikel dapat ditemukan dalam dua jenis, yaitu nikel primer yang terbentuk dari proses pembekuan magma ultrabasa, serta nikel sekunder yang terbentuk melalui proses pengkayaan sekunder di bawah lapisan air tanah (water table). Di Indonesia, cadangan nikel yang ditemukan umumnya berupa nikel sekunder yang dikenal sebagai nikel laterit. Nikel memiliki sifat tahan terhadap korosi atau karat. Istilah “laterit” sendiri mengacu pada endapan yang kaya akan oksida besi, rendah kandungan silika dan terbentuk dari hasil pelapukan batuan di wilayah beriklim tropis (A Isjudarto, 2013).

Berbagai metode baru telah dikembangkan untuk memanfaatkan nikel laterit sebagai sumber nikel, termasuk melalui penggunaan asam sulfat, teknologi kimia, dan pendekatan bioteknologi. Proses ekstraksi nikel laterit menggunakan metode hidrometalurgi dianggap lebih efisien karena membutuhkan energi yang lebih rendah dan menghasilkan emisi gas buang yang lebih sedikit dibandingkan metode pirometalurgi. Selain itu, pengendalian proses serta sirkulasi larutan pelindi dalam hidrometalurgi lebih mudah dilakukan. Oleh karena itu, bijih nikel laterit dengan kadar rendah dapat diekstraksi secara lebih optimal menggunakan metode ini. Salah satu teknik hidrometalurgi yang banyak digunakan untuk mengekstraksi nikel dari bijih laterit adalah Atmospheric Acid Leaching (AAL).

Proses Atmospheric Acid Leaching (AAL) dianggap efisien karena mampu menghemat energi serta menghasilkan produk dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Dengan keunggulan tersebut, penerapan metode AAL pada skala industri di Indonesia diharapkan dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi pemanfaatan sumber daya nikel laterit dalam negeri (Permana dkk., 2020).

Metode atmospheric leaching menarik perhatian karena mampu beroperasi pada temperatur di atas 100 °C dengan tekanan atmosfer, serta dapat mengolah bijih nikel laterit berkadar rendah (<1,5% berat). Proses ini juga memiliki biaya operasi yang relatif rendah dan dapat diterapkan baik pada jenis bijih nikel limonit maupun saprolit. Konsentrasi nikel yang terlarut dari proses pelindian pada kondisi atmosferik dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis asam yang digunakan sebagai reagen pelindi, konsentrasi asam, temperatur operasi, serta waktu pelindian yang menentukan efisiensi reaksi pelarutan logam nikel dari mineral bijih. Selain itu, ukuran partikel dan kecepatan pengadukan juga dapat memengaruhi tingkat pelindian secara signifikan. (Wahab dkk., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh (Tyassena, Prameswara dan Suherman, 2023), Studi Pengaruh Konsentrasi Solvent dan Kondisi Operasi Terhadap Persen (%) Recovery Nikel Pada Proses Atmospheric Leaching Ore Laterite Asal Morowali dengan asam Sulfat, Konsentrasi asam sulfat (0,5–2 M), rasio padatan terhadap pelarut (5–25%), dan waktu pelindian Konsentrasi H₂SO₄ dan waktu pelindian meningkatkan recovery nikel, sedangkan rasio S/L yang lebih besar menurunkannya. Kondisi optimum dicapai pada 2 M H₂SO₄, S/L 5%, dan 250 menit, dengan recovery >63%.

METODE PENELITIAN

Preparasi sampel bijih akan dilakukan di Laboratorium Internal PT. Riota Jaya Lestari, Kolaka Utara, Sulawesi Tenggara. Eksperimen pelindian akan dilakukan di Laboratorium Proses Universitas Muslim Indonesia, Makassar, Sulawesi Selatan. Pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) akan dilakukan di PT. Riota Jaya Lestari, Lambai, Kolaka Utara, Sulawesi Tenggara. Waktu pelaksanaan penelitian terhitung mulai dari bulan Februari sampai Juni

2026.

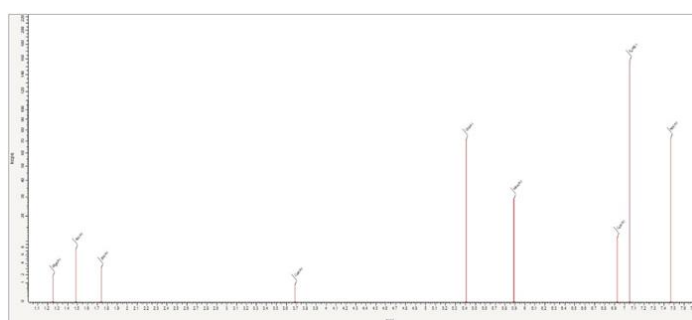
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Analisis Kimia

Data analisa yang diperoleh dari hasil analisis dengan menggunakan Wavelength X-Ray Fluorescence dilakukan untuk mengetahui konsentrasi elemen atau komposisi kimia yang ada pada sampel bijih limonit awal dengan ukuran partikel < 200 mesh dalam satuan persen.

Tabel 1 Komposisi Kimia Bijih Limonit Lambai

Sample ID	Element of Analysis (%)									
	Fe	Ni	Co	Mg	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	S/M
ORE LMB	42,200	1,530	0,132	2,180	6,590	0,060	11,720	3,460	1,570	3,023



Gambar 1 XRF Analysis Bijih Limonit Lambai

Berdasarkan data pada Tabel 1, besi (Fe) merupakan unsur logam utama yang mendominasi batuan, ditandai dengan puncak terbesar pada kurva XRF dan persentase konsentrasi tertinggi mencapai 42,20%. Selain itu, sampel ini memiliki kadar nikel (Ni) sebesar 1,53% dan kobalt (Co) sebesar 0,132%.

Tingginya kadar besi (>40%) dan kadar nikel yang berada di bawah 2% ini mengindikasikan bahwa sampel batuan laterit tersebut berasal dari zona limonit. Hal ini sejalan dengan literatur mengenai komposisi mineralogi limonit, di mana kadar nikel umumnya berkisar antara 0,8% hingga 1,9% dan kadar besi berkisar antara 40% hingga 70%. Selain unsur utama tersebut, hasil XRF juga mendeteksi keberadaan senyawa oksida lain yang menjadi komponen pembentuk batuan (gangue minerals), di antaranya Alumina (Al₂O₃) sebesar 11,720%, Silika (SiO₂) sebesar 6,590%, Kromium Oksida (Cr₂O₃) sebesar 3,460%, dan Magnesia (Mg) sebesar 2,180% (Chaerun et al., 2017; Mayangsari and Prasetyo, 2017).

Penelitian ini menggunakan metode One-Factor-at-a-Time (OFAT) sebagai pendekatan utama dalam menentukan kondisi optimum proses pelindian nikel. Strategi ini dipilih untuk melakukan eksplorasi awal guna menetapkan rentang operasi yang relevan secara empiris serta mengkaji pengaruh signifikan dari masing-masing variabel bebas yaitu konsentrasi H₂SO₄, temperatur, dan waktu terhadap perolehan nikel. Pregnant leach residue hasil proses pelindian kemudian dianalisis menggunakan Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (WD-XRF) untuk mengukur kadar nikel residu yang tersisa pada bijih. Selanjutnya, efisiensi ekstraksi nikel dihitung melalui perhitungan neraca massa berdasarkan data analisis tersebut, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 2 Perolehan Nikel pada Residu dan Persen Ekstraksi Hasil Pelindian

ID	Massa (gr)		Kadar Ni (%)		%Ekstraksi Ni
	Ore awal	Residu	Ore awal	Residu	

OFAT.K.1	20	11,2587	1,530	1,110	59,16
OFAT.K.3		9,2945		0,680	79,35
OFAT.K.5		7,6585		0,310	88,24
OFAT.K.7		6,1846		0,380	92,17
OFAT.T.50		7,7682		0,760	80,71
OFAT.T.70		7.5053		0,400	90,19
OFAT.T.90		6.0521		0,325	93,57
OFAT.T.100		5.3917		0,235	95,86
OFAT.T.110		7,8423		0,375	90,39
OFAT.T.120		8,9738		0,430	87,39
OFAT.W.60		7,0427		0,290	93,33
OFAT.W.120		5,8642		0,245	95,30
OFAT.W.180		5,0794		0,235	95,28
OFAT.W.240		4,6105		0,220	96,69

2. Pengaruh Konsentrasi H₂SO₄ terhadap Ekstraksi Ni

Konsentrasi asam sulfat (H₂SO₄) merupakan salah satu parameter yang sangat memengaruhi keberhasilan proses Atmospheric Acid Leaching (AAL) karena menentukan jumlah ion hidrogen (H⁺) yang tersedia untuk melarutkan mineral pembawa nikel pada bijih limonit. Semakin tinggi konsentrasi H₂SO₄, semakin banyak ion H⁺ yang dapat bereaksi dengan mineral penyusun bijih sehingga proses pelarutan nikel berlangsung lebih cepat. Peningkatan jumlah ion H⁺ juga memperbesar peluang terjadinya tumbukan efektif antara larutan pelindi dan permukaan partikel bijih, sehingga laju reaksi pelindian meningkat (Habashi., 1999; Geankoplis, 2003).

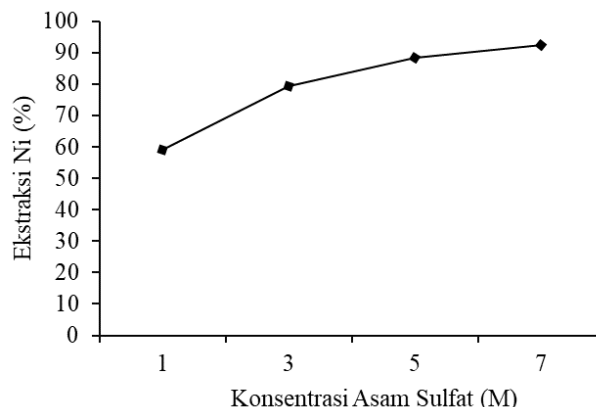
Berdasarkan Gambar 4.2, peningkatan konsentrasi H₂SO₄ dari 1 M hingga 7 M menyebabkan persen ekstraksi nikel meningkat secara bertahap, yaitu dari 59,16% pada konsentrasi 1 M, menjadi 79,35% pada 3 M, kemudian meningkat menjadi 88,24% pada 5 M, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 92,32% pada konsentrasi 7 M. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi H₂SO₄, semakin besar kemampuan larutan dalam melarutkan mineral pembawa nikel. Bertambahnya jumlah ion H⁺ meningkatkan frekuensi tumbukan efektif dengan permukaan partikel sehingga proses pelindian berlangsung lebih cepat dan jumlah nikel yang berhasil diekstraksi semakin besar (Habashi, 1999).

Peningkatan ekstraksi nikel juga dipengaruhi oleh meningkatnya gradien konsentrasi antara larutan pelindi dan permukaan partikel bijih. Kondisi ini mempercepat perpindahan massa dan difusi ion H⁺ ke dalam pori-pori partikel sehingga kontak antara larutan pelindi dan mineral pembawa nikel menjadi lebih efektif. Akibatnya, proses pelarutan nikel berlangsung lebih optimal dan menghasilkan persen ekstraksi yang lebih tinggi (Geankoplis, 2003).

Pada penelitian ini, konsentrasi 7 M menghasilkan persen ekstraksi nikel tertinggi sebesar 92,32%, sehingga ditetapkan sebagai kondisi optimum dalam rentang konsentrasi yang diteliti. Hasil ini menunjukkan bahwa hingga konsentrasi 7 M, penambahan H₂SO₄ masih mampu meningkatkan efektivitas proses pelindian. Hasil penelitian ini sejalan dengan McDonald dan Whittington (2008) yang menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi H₂SO₄ meningkatkan laju pelarutan mineral laterit karena jumlah ion H⁺ yang tersedia semakin banyak.

Namun demikian, penelitian ini hanya menguji variasi konsentrasi hingga 7 M sehingga belum dapat disimpulkan apakah penggunaan konsentrasi di atas 7 M, seperti 8 M, akan memberikan peningkatan atau justru penurunan persen ekstraksi nikel. Berdasarkan

literatur, penggunaan H_2SO_4 pada konsentrasi yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan konsumsi asam akibat pelarutan logam pengotor seperti Fe, Al, dan Mg serta dapat menurunkan selektivitas proses pelindian (McDonald & Whittington, 2008). Oleh karena itu, pengaruh penggunaan konsentrasi di atas 7 M perlu dikaji lebih lanjut pada penelitian berikutnya.



Gambar 2 Grafik Pengaruh Konsentrasi Asam terhadap Ekstraksi Nikel

3. Pengaruh Temperatur Pelindian terhadap Ekstraksi Ni

Temperatur merupakan salah satu parameter penting dalam proses Atmospheric Acid Leaching (AAL) karena memengaruhi laju reaksi kimia, energi aktivasi, dan perpindahan massa selama proses pelindian. Peningkatan temperatur menyebabkan energi kinetik molekul meningkat sehingga frekuensi tumbukan efektif antara ion H^+ dan mineral pembawa nikel menjadi lebih besar. Akibatnya, proses pemutusan ikatan logam nikel dengan mineral oksida berlangsung lebih cepat dan jumlah nikel yang terlarut meningkat (Levenspiel, 1999; Geankoplis, 2003).

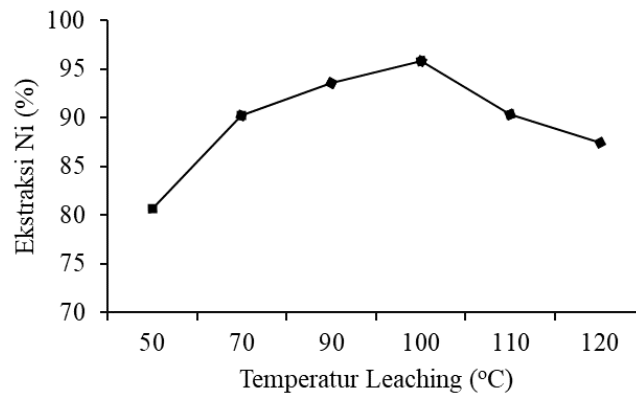
Berdasarkan Gambar 4.3, persen ekstraksi nikel mengalami peningkatan dari 80,71% pada temperatur 50°C menjadi 90,19% pada 70°C , kemudian meningkat menjadi 93,57% pada 90°C , dan mencapai nilai tertinggi sebesar 95,86% pada temperatur 100°C . Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur mampu mempercepat kinetika reaksi pelindian sehingga proses pelarutan mineral pembawa nikel berlangsung lebih efektif.

Temperatur 100°C menghasilkan persen ekstraksi tertinggi sebesar 95,86%, sehingga ditetapkan sebagai kondisi optimum pada penelitian ini. Pada temperatur tersebut, energi yang diberikan telah cukup untuk meningkatkan laju reaksi sekaligus mempercepat difusi ion H^+ menuju permukaan dan pori-pori partikel bijih. Kondisi ini menyebabkan kontak antara larutan pelindi dan mineral pembawa nikel menjadi lebih optimal sehingga ekstraksi nikel mencapai nilai maksimum (Levenspiel, 1999).

Persen ekstraksi nikel tertinggi diperoleh pada temperatur 100°C , sehingga temperatur tersebut ditetapkan sebagai kondisi optimum pada penelitian ini. Pada temperatur ini, laju reaksi pelindian berlangsung secara maksimal tanpa mengganggu kestabilan sistem. Energi yang diberikan telah cukup untuk mempercepat reaksi pelarutan nikel sekaligus meningkatkan perpindahan massa antara larutan dan partikel bijih sehingga menghasilkan persen ekstraksi nikel tertinggi

Namun, ketika temperatur dinaikkan menjadi 110°C , persen ekstraksi menurun menjadi 90,39%, dan kembali menurun menjadi 87,39% pada temperatur 120°C . Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur tidak selalu meningkatkan ekstraksi nikel. Pada temperatur yang terlalu tinggi, sebagian ion besi yang terlarut dapat mengalami hidrolisis sehingga membentuk endapan seperti hematit atau jarosit. Endapan tersebut dapat membentuk lapisan pasivasi (passivation layer) pada permukaan partikel bijih

yang menghambat difusi ion H^+ menuju bagian dalam partikel. Selain itu, temperatur yang semakin tinggi juga meningkatkan penguapan air pada sistem atmosferik sehingga kestabilan proses pelindian menurun dan efisiensi ekstraksi menjadi lebih rendah. Hasil penelitian ini sejalan dengan McDonald dan Whittington (2008) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur meningkatkan laju pelindian hingga mencapai kondisi optimum, tetapi temperatur yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi ekstraksi akibat pembentukan lapisan pasivasi dan meningkatnya reaksi samping selama proses pelindian.



Gambar 3 Grafik Pengaruh Temperatur Leaching terhadap Ekstraksi Nikel

4. Pengaruh Waktu Pelindian terhadap Ekstraksi Ni

Pengaruh durasi waktu pelindian terhadap efisiensi ekstraksi nikel dari bijih laterit dikaji pada rentang waktu 60 hingga 240 menit. Eksperimen ini dijalankan dengan mempertahankan kondisi operasi optimum yang diperoleh dari tahapan studi OFAT sebelumnya, yaitu temperatur pelindian $90^{\circ}C$ dan konsentrasi asam sulfat (H_2SO_4) 7 M, dengan kecepatan agitasi sebesar 350 rpm serta rasio padat terhadap cair (S/L) $0,2 \text{ g/cm}^3$.

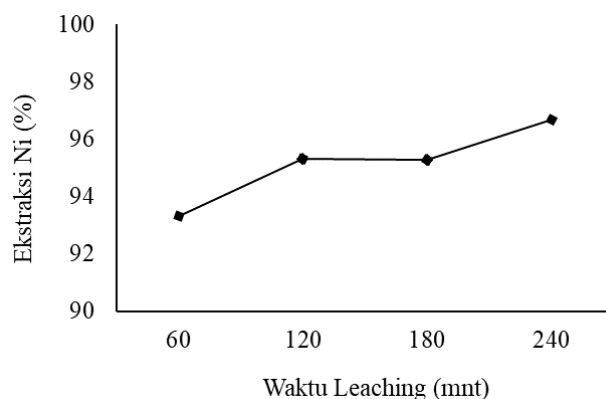
Berdasarkan tren data yang direpresentasikan pada Grafik 4.3, terdapat korelasi positif antara durasi waktu pelindian (leaching time) dengan persentase ekstraksi nikel. Seiring bertambahnya waktu kontak dari 60 menit hingga 240 menit, persen ekstraksi nikel mengalami peningkatan secara konsisten, dimulai dari 93,33% pada menit ke-60 dan mencapai nilai puncaknya sebesar 96,69% pada menit ke-240.

Di sisi lain, laju disolusi nikel menunjukkan sedikit perlambatan pada paruh akhir reaksi. Penurunan persentase ekstraksi pada rentang menit ke-120 hingga ke-180 tidak bersifat signifikan. Kenaikan yang terjadi di akhir sesi reaksi pun relatif kecil, yakni hanya sebesar 1,39% dari menit ke-120. Fenomena ini mengindikasikan karakteristik kinetika pelindian dua tahap (two-stage leaching kinetics). Selama 60 menit pertama, laju reaksi berlangsung sangat cepat lantaran ion H^+ dari ligan asam berkonsentrasi tinggi (7 M) berinteraksi secara masif dengan nikel bebas yang berada di permukaan partikel bijih (Faris et al., 2023).

Namun, seiring berjalannya waktu reaksi, fasa mineral pengotor (gangue minerals) ikut terlarut dan membentuk lapisan produk padat berupa abu (ash layer) atau matriks silika tidak larut yang menyelimuti inti partikel bijih yang belum bereaksi (unreacted core) (Wanta et al., 2017). Ketebalan lapisan produk ini terus meningkat secara spasial, bertindak sebagai hambatan fisik (physical barrier) yang menimbulkan resistensi transfer massa yang tinggi. Akibatnya, laju difusi ion H^+ untuk menembus pori padatan serta laju difusi keluar dari ion Ni^{2+} menuju larutan kaya (pregnant leach solution/PLS) menjadi sangat terhambat.

Kondisi ini secara eksplisit menunjukkan bahwa setelah fase disolusi permukaan awal selesai, mekanisme pengendali laju pelindian pada tahap lanjut bertransisi menjadi dikendalikan oleh difusi melalui lapisan produk (product layer diffusion control) (Phyo et al., 2020). Berdasarkan studi OFAT ini, waktu pelindian selama 120 menit dipertimbangkan

sebagai titik operasi yang paling efektif. Perpanjangan waktu hingga 240 menit tidak lagi efisien secara ekonomi karena peningkatan yield yang diperoleh sangat minor (1,46%), sedangkan konsumsi energi untuk pengadukan dan pemanasan reaktor akan meningkat dua kali lipat.



Gambar4 Grafik Pengaruh Waktu Leaching terhadap Ekstraksi Nikel

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pelindian bijih nikel laterit asal Kolaka Utara menggunakan metode Atmospheric Acid Leaching (AAL) dengan pendekatan One-Factor-at-a-Time (OFAT), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Konsentrasi Asam Sulfat (H_2SO_4) berpengaruh terhadap persen ekstraksi nikel. Peningkatan konsentrasi H_2SO_4 dari 1 M hingga 7 M meningkatkan persen ekstraksi nikel dari 59,16% menjadi 92,32%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi H_2SO_4 , semakin banyak ion H^+ yang tersedia untuk melarutkan mineral pembawa nikel sehingga proses pelindian berlangsung lebih efektif. Berdasarkan rentang konsentrasi yang diteliti, konsentrasi optimum diperoleh pada 7 M dengan persen ekstraksi nikel sebesar 92,32%.
2. Temperatur Pelindian juga berpengaruh terhadap persen ekstraksi nikel. Persen ekstraksi meningkat dari 80,71% pada temperatur 50 °C menjadi 95,86% pada temperatur 100 °C, kemudian menurun menjadi 90,39% pada 110 °C dan 87,39% pada 120 °C. Peningkatan ekstraksi hingga 100 °C terjadi karena kenaikan temperatur mempercepat laju reaksi pelindian dan perpindahan massa antara larutan pelindi dan partikel bijih. Penurunan ekstraksi pada temperatur di atas 100 °C diduga disebabkan oleh terbentuknya lapisan pasivasi akibat pengendapan senyawa besi serta berkurangnya kestabilan sistem pelindian. Oleh karena itu, temperatur optimum pada penelitian ini diperoleh pada 100 °C dengan persen ekstraksi nikel sebesar 95,86%.
3. Waktu Pelindian optimum durasi waktu pelindian menunjukkan korelasi positif terhadap perolehan yield nikel, dengan nilai puncak secara teknis dicapai pada waktu 240 menit sebesar 96,69%. Meski demikian, dilihat dari aspek efisiensi energi reaktor, waktu pelindian selama 120 menit (dengan yield 95,23%) ditetapkan sebagai kondisi optimum operasional. Hal ini dikarenakan setelah menit ke-120 reaksi telah memasuki fase plateau (hanya naik 1,46% hingga menit ke-240) akibat tebalnya lapisan abu (ash layer/matriks silika) yang mengalihkan kendali laju reaksi menjadi kontrol difusi produk.

Saran

Guna pengembangan ilmu pengetahuan hidrometalurgi serta penyempurnaan studi lanjutan dari penelitian skala laboratorium ini, disarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Karakterisasi residu pembakaran (Post-Leaching Analysis) perlu dilakukan analisis lanjutan menggunakan instrumen X-Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) pada pregnant leach residue. Hal ini penting untuk membuktikan secara visual dan mineralogis keberadaan fasa pasivasi (seperti jarosit atau gel silika) yang terbentuk pada temperatur tinggi dan waktu lanjut.
2. Pemodelan kinetika secara matematis disarankan untuk melakukan komputasi data terhadap hasil OFAT ini menggunakan pendekatan Shrinking Core Model (SCM) untuk menentukan nilai energi aktivasi (E_a) secara eksak, sehingga transisi kontrol kinetika (kontrol reaksi kimia ke kontrol difusi) dapat divalidasi secara matematis.
3. Optimasi variabel terikat lainnya untuk penelitian selanjutnya, variabel yang pada studi ini dijaga konstan seperti rasio solid/liquid (S/L), kecepatan agitasi, ukuran partikel, maupun pengaruh perlakuan awal berupa pra-kalsinasi—dapat mulai diteliti pengaruh individunya terhadap efisiensi pelindian.
4. Studi up-scaling dan tekno-ekonomi mengingat penelitian ini masih terbatas pada skala laboratorium, perlu dilakukan studi peningkatan skala (scale-up) ke unit bench atau pilot plant, disertai dengan kajian kelayakan teknis dan analisis ekonomi makro untuk melihat potensi aplikasinya di sektor industri hidrometalurgi hilir Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- A Isjudarto (2013) ‘SEMINAR NASIONAL ke 8 Tahun 2013 : Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi Pengaruh Morfologi Lokal terhadap Pembentukan Nikel Laterit’, pp. 10–14.
- Bahfie, F., Manaf, A., Astuti, W., Nurjaman, F. dan Herlina, U. (2021) ‘Tinjauan Teknologi Proses Ekstraksi Bijih Nikel Laterit Review on Technology of Nickel Laterite Extraction’, 17(April), pp. 135–152. Available at: <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol17.No3.2021.1156>.
- Faiz, M.A., Sufriadin, S. dan Widodo, S. (2020) ‘Analisis Perbandingan Kadar Bijih Nikel Laterit Antara Data Bor dan Produksi Penambangan: Implikasinya terhadap Pengolahan Bijih pada Blok X, PT. Vale Indonesia, Tbk. Sorowako’, Jurnal Penelitian Enjiniring, 24(1), pp. 93–99. Available at: <https://doi.org/10.25042/jpe.052020.13>.
- Geankoplis, C. J. (2003). Transport Processes and Separation Process Principles (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Habashi, F. (1999). Textbook of Hydrometallurgy. Québec: Métallurgie Extractive Québec.
- Harahap, M.G.M. dan Novitasari, E.D. (2022) ‘Geomorfologi dan Karakteristik Nikel Laterit Di Desa Baingket Distrik Makbon Kabupaten Sorong Provinsi Papua Barat’, 5, pp. 27–34.
- Jarot, J.P. dan Astuti, T.L.R. (2023) ‘Nikel Laterit Pulau Gag: Menelusuri Proses Terbentuknya dan Implikasinya dalam Industri Pertambangan’, ReTII, 18(1), pp. 871–880.
- Levenspiel, O. (1999). Chemical Reaction Engineering (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Lintjewas, L., Setiawan, I. dan Kausar, A. Al (2019) ‘Profil Endapan Nikel Laterit di Daerah Palangga, Provinsi Sulawesi Tenggara’, Riset Geologi dan Pertambangan, 29(1), p. 91. Available at: <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2019.v29.970>.
- McDonald, R. G., & Whittington, B. I. (2008). Atmospheric Acid Leaching of nickel laterites review: Part I. Sulphuric acid technologies. Hydrometallurgy, 91(1–4), 35–55. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.11.009>
- Muntaqin, A., Rahmasari, L., Wahyuni, N. L. E. dan Sihombing, R.P. (2022) ‘The Effect Of Sulfuric Acid Concentration On Nickel Recovery From Laterite Ore By Using Atmospheric Acid Leaching Method’, 7(1), pp. 20–27.
- Mustam, M., Azis, H. A., Ramdani, N., Amin, I. I. dan Ariski, A. (2024) ‘Analysis Of The Effect Of Moisture And Loss On Ignition (LOI) On Measurement Of Iron Ore Laterite Samples With Fusion Bead XRF S8 Tiger’, Jurnal Sains dan Teknologi, 4(1), pp. 7–23.
- Nurfaidah, A.Y., Lestari, D.P., Azzahra, R. T. dan Suminar, R. (2020) ‘ Kajian Pustaka Pengaruh Temperatur dan Konsentrasi terhadap Proses Pemisahan Nikel dari Logam Pengotor menggunakan Metode Leaching’, fluida, 13(2), pp. 83–92.
- Permana, D., Kumalasari, R., Wahab dan Musnajam. (2020) ‘Pelindian Bijih Nikel Laterit Kadar

- Rendah menggunakan Metode Atmospheric Acid Leaching dalam Media Asam Klorida (Hcl)', Riset Geologi dan Pertambangan, 30(2),
- Prameswara, G. dan Amin, I. (2022) 'Perbandingan Batubara dan Caso_4 Sebagai Reduktor dalam Proses Reduksi Bijih Nikel Laterit', 1, pp. 31–35.
- Raivel, Hasrianto, Amir, M. K., Dzakir, L. O. (2023) 'Karakteristik Endapan Nikel Laterit Daerah Molawe Kabupaten Konawe Utara Provinsi Sulawesi Tenggara', 2(109), pp. 178–191.
- Setiawan, I. (2016) 'Pengolahan Nikel Laterit Secara Pirometalurgi ', (November), pp. 1–7.
- Tyassena, F.Y.P., Prameswara, G. dan Suherman, A.F. (2023) 'Studi Pengaruh Konsentrasi Solvent dan Kondisi Operasi terhadap Persen (%) Recovery Nikel pada Proses Atmospheric Leaching Ore Laterite Asal Morowali dengan Asam Sulfat', (2655).
- Wahab, Anshari, E., Mili, M. Z., Nafiu, R. A., Khaq, M. N., Deniyanto, Firdaus, Supriyatna, Y.I. (2021) 'Studi Pengaruh Variabel Proses dan Kinetika Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel Laterit menggunakan Larutan Asam Sulfat pada Tekanan Atmosferik', Jurnal Rekayasa Proses, 15(1), p. 37. Available at: <https://doi.org/10.22146/jrekpros.61533>.