



PENGARUH SUHU DAN KECEPATAN PENGADUKAN TERHADAP PERSEN EKSTRAKSI NIKEL DARI BIJIH LATERIT DENGAN PELARUT ASAM SITRAT

Muh. Azis Albar. J^{a,*}, Sholihin^a, Ardiansah^a, Irhamni Nuhardin^b

^aProgram Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik Industri Logam Morowali
Jalan Poros Trans Sulawesi, Morowali 94974

^bProgram Studi Teknologi Rekayasa Pangan, Politeknik Dewantara
Jl. KH. Ahmad Razak 2, No. 7, Kota Palopo

*E-mail: azis.albar.j@gmail.com

Masuk Tanggal: 7 Mei, revisi tanggal: 21 Mei, diterima untuk diterbitkan tanggal: 30 Juni 2025

Abstrak

Studi ini menyelidiki bagaimana suhu dan kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap persen ekstraksi pelindian nikel dari bijih laterit dengan pelarut asam sitrat sebagai reagen pelindih ramah lingkungan. Bijih laterit yang digunakan merupakan tipe saprolit yang didominasi oleh senyawa nikel dalam fase garnierit. Proses pelindian dilakukan secara atmosferik dengan variasi suhu 65°C, 75°C, 85°C, dan 95°C dan kecepatan pengadukan 300, 400, 500, dan 600 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara signifikan meningkatkan persen ekstraksi nikel, terutama pada suhu 95°C, akibat peningkatan energi kinetik dan kelarutan ion nikel. Selain itu, kecepatan pengadukan yang optimal juga berkontribusi dalam mempercepat laju transfer massa dan meningkatkan homogenitas larutan, dengan persen ekstraksi tertinggi sebesar 61,69% diperoleh pada kecepatan 600 rpm. Penelitian ini menunjukkan bahwa parameter suhu dan kecepatan pengadukan memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi pelindian nikel laterit menggunakan asam organik. Penelitian ini mendukung pendekatan hidrometalurgi berkelanjutan untuk pemanfaatan sumber daya nikel laterit di Indonesia.

Kata Kunci: Pelindian nikel, Bijih laterit, Asam sitrat, Suhu, Kecepatan pengadukan

Abstract

This study aims to investigate the effect of temperature and stirring speed on the leaching efficiency of nickel from laterite ore using citric acid as an environmentally friendly complexing agent. The laterite ore used is of the saprolite type, dominated by nickel-bearing garnierite phases. Atmospheric leaching was carried out with temperature variations ranging from 65°C, 75°C, 85°C dan 95°C and stirring speeds from 300 rpm, 400 rpm, 500 rpm, dan 600 rpm. The results indicate that increasing temperature significantly enhances nickel extraction, particularly at 95°C, due to increased kinetic energy and ion solubility. Moreover, optimal stirring speed contributes to improved mass transfer rates and solution homogeneity, with the highest extraction percentage of 61,69% achieved at 600 rpm. These findings demonstrate that temperature and agitation play crucial roles in enhancing the efficiency of laterite nickel leaching using organic acids. This research supports a sustainable hydrometallurgical approach for the utilization of Indonesia's laterite nickel resources.

Keywords: Nickel leaching, Laterite ore, Citric acid, Temperature, Stirring speed

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan bijih nikel laterit terbesar di dunia, terutama dalam bentuk limonit dan saprolit [1]. Total produksi nikel di negara ini mencapai >1

juta metrik ton pada tahun 2021 [2]. Hal ini menempatkan Indonesia sebagai aktor kunci dalam rantai pasok industri nikel dunia, terutama untuk sektor strategis seperti baterai kendaraan listrik dan baja nirkarat (*stainless steel*). Bijih

nikel laterit memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber bahan baku industri, terutama dalam pembuatan *stainless steel* dan baterai kendaraan listrik [3]. Namun, pengolahan bijih nikel laterit menghadapi tantangan karena kandungan nikel yang relatif rendah dan keberadaan unsur pengotor seperti besi dan silika [4]. Kandungan unsur-unsur itu dapat mempengaruhi efisiensi proses pengolahan dan kualitas produk akhir [5]. Metode hidrometalurgi, khususnya pelindian atmosferik, telah menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mengekstraksi nikel dari bijih laterit [6]. Penggunaan pelarut asam organik seperti asam sitrat dalam proses pelindian menawarkan keuntungan berupa selektivitas yang lebih baik terhadap nikel dan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan asam anorganik kuat [7] [8].

Hasil pelindian terdahulu, bijih limonit dari Morowali menggunakan asam sitrat pada suhu 70°C, kecepatan pengadukan 1000 rpm, dan waktu proses 120 menit menunjukkan rekoveri nikel mencapai 2824 ppm [9]. Hasil ini menunjukkan potensi besar penggunaan asam sitrat dalam proses pelindian bijih nikel laterit. Namun, penelitian tersebut belum melakukan evaluasi menyeluruh dampak interaksi antar parameter seperti suhu dan kecepatan pengadukan, dan hanya melihat satu kondisi proses. Selain itu, penelitian sebelumnya berkonsentrasi pada jenis bijih limonit. Sementara sifat mineralogi dan respons pelindian dari jenis saprolit yang memiliki kandungan magnesium dan silika tinggi dapat sangat berbeda. Sehingga studi lanjutan diperlukan, yang tidak hanya menunjukkan efisiensi asam sitrat, tetapi juga mempelajari parameter operasi utama dalam konteks bijih saprolit untuk mengoptimalkan efisiensi proses pelindian secara keseluruhan.

Variasi suhu dan kecepatan pengadukan merupakan parameter penting yang mempengaruhi efisiensi proses pelindian [10]. Suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju reaksi kimia dan kelarutan nikel [11] [12], sementara kecepatan pengadukan yang optimal memastikan distribusi pelarut yang merata dan kontak yang efektif antara pelarut dan bijih [13].

Meskipun pengaruh dari masing-masing parameter telah banyak dibahas dalam literatur, masih terdapat keterbatasan dalam pemahaman mengenai bagaimana interaksi antara suhu dan kecepatan pengadukan secara simultan memengaruhi proses pelindian, khususnya dalam pelarut asam organik seperti asam sitrat. Beberapa studi sebelumnya cenderung mengisolasi masing-masing variabel, sehingga tidak memberikan gambaran menyeluruh tentang sinergi keduanya

terhadap efisiensi ekstraksi logam. Selain itu, dalam kondisi operasi ekstrem seperti suhu tinggi atau pengadukan intensif, dapat terjadi degradasi pelarut atau turbulensi berlebih yang justru menurunkan efisiensi pelindian. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi eksperimental yang sistematis guna mengidentifikasi titik operasi optimal dari kombinasi kedua parameter tersebut, yang tidak hanya efektif secara teknis tetapi juga efisien secara energi dan ramah lingkungan. Hal ini penting untuk mengoptimalkan proses pelindian dan meningkatkan rekoveri nikel secara efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab kekosongan studi sebelumnya dengan mengkaji secara sistematis pengaruh kedua parameter tersebut dalam proses pelindian bijih nikel laterit menggunakan asam sitrat.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Studi eksperimental ini melibatkan proses pelindian dengan variasi suhu dan kecepatan pengadukan agar mengetahui pengaruhnya terhadap persen ekstraksi nikel yang dihasilkan menggunakan metode *atmospheric pressure acid leaching*. Penelitian ini menggunakan larutan pelindi asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dan sampel bijih nikel laterit jenis saprolite yang berasal dari kawasan industri, Kabupaten Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah.

Pada tahap awal, dilakukan preparasi sampel bijih nikel laterit dan larutan asam. Preparasi sampel bijih meliputi beberapa tahapan, yaitu: pengeringan di bawah matahari selama 24 jam, pengecilan bijih, pengayakan hingga mencapai ukuran 250 mesh. Tahap pengecilan bijih dilakukan pada alat *jaw crusher*, *hammer mill*, dan juga *ball mill* untuk selanjutnya dilakukan pengayakan hingga didapatkan ukuran 250 mesh. Lalu dipanaskan dalam oven dengan suhu 105 °C selama satu jam untuk selanjutnya dilakukan pengujian awal menggunakan instrumen *X-ray fluorescence (Panalytical Epsilon 3 XRF)*. Untuk membuat larutan asam sitrat 2,5 M, dilakukan dengan menimbang 240 ml asam sitrat lalu dimasukkan ke dalam labu pengencer 500 ml dan ditambahkan aquades kemudian dihomogenkan.

Proses pelindian dilakukan pada reaktor berleher lima kapasitas 1 liter yang dilengkapi dengan kondensor spiral untuk memastikan larutan tidak menguap.

Parameter pelindian yang digunakan mengacu pada penelitian sebelumnya Albar, J. M, et al (2023) [14]. Rasio massa *solid* dan *liquid (pulp density)* yang digunakan 1:5. Diawali dengan menimbang sampel bijih sebanyak 37,5 gram, dan dimasukkan ke dalam gelas reaktor, kemudian

ditambahkan larutan asam sitrat 2,5 Molar sebanyak 250 ml. Selanjutnya dipanaskan pada reaktor yang terhubung dengan kondensor menggunakan *hot plate* sehingga mencapai suhu yang diinginkan yakni 65 °C, 75 °C, 85 °C, dan 95 °C dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan yang divariasikan 300 rpm, 400 rpm, 500 rpm, dan 600 rpm. Pelindian dilakukan selama lima jam dihitung saat tercapainya suhu yang diinginkan. Setelah proses pelindian selesai dilanjutkan dengan penyaringan untuk memisahkan filtrat dan residu dari larutan pelindian. Sampel disaring menggunakan kertas saring sampai filtrat benar-benar terpisah dari residunya (filtrat berwarna hijau muda). Filtrat yang diperoleh kemudian diuji menggunakan instrumen *atomic absorption spectroscopy* (AAS *Buck Scientific* 205).

Data hasil pengujian XRF dan AAS akan digunakan sebagai acuan dalam menghitung kadar nikel dalam bijih dan filtrat. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai persen ekstraksi nikel. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai persen ekstraksi adalah Persamaan 1 [15].

$$\% \text{ Ekstraksi Ni} = \frac{\text{Ni dalam filtrat (mg)}}{\text{Ni dalam bijih (mg)}} \times 100\% \quad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bijih nikel laterit diuji menggunakan alat XRF, untuk mengetahui konsentrasi unsur yang terkandung di dalamnya. Hasil pengujian komposisi pada sampel dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi bijih nikel laterit

Unsur / Senyawa	Konsentrasi (%)
Ni	2,33
Fe	9,50
Co	0,05
Na ₂ O	0,01
MgO	30,91
Al ₂ O ₃	0,41
SiO ₂	39,59
P ₂ O ₅	0,01
SO ₃	0,01
K ₂ O	0,01
CaO	0,29
TiO ₂	0,01
Cr ₂ O ₃	0,24
MnO	0,16
MC	-

Dari Tabel 1, diketahui kandungan nikel pada bijih adalah 2,33%, magnesium oksida 30,91%, dan silika 39,59% yang tinggi, serta besi 9,50% yang relatif rendah. Dapat disimpulkan bahwa bijih tersebut merupakan bijih nikel laterit jenis

saprolit [16]. Kandungan dominan MgO dan SiO₂ mengindikasikan bahwa fase mineral utama dalam bijih ini adalah *garnierite*, yaitu mineral silikat nikel-magnesium yang umum ditemukan pada zona saprolit. *Garnierite* terbentuk melalui proses laterisasi, dimana nikel menggantikan magnesium dalam struktur mineral akibat pelapukan ultramafik [17].

Kadar nikel hasil pengujian instrumen AAS dimasukkan ke dalam rumus perhitungan untuk memperoleh nilai persen ekstraksi masing-masing variabel. Hasil perhitungan persen ekstraksi nikel yang diperoleh disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil perhitungan persen ekstraksi nikel

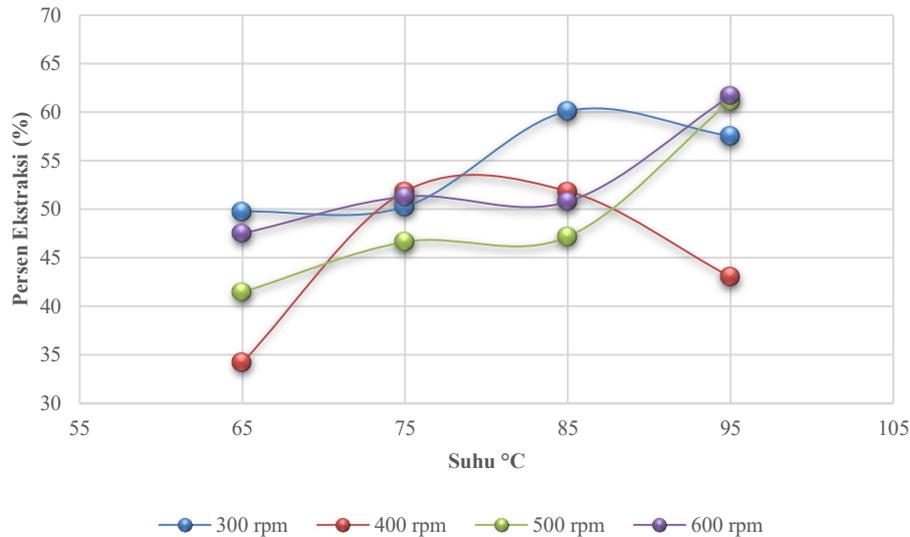
Suhu (°C)	Kecepatan pengadukan (rpm)	Persen ekstraksi Ni (%)
65	300	49,76
	400	34,22
	500	41,46
75	600	47,50
	300	50,27
	400	51,85
85	500	46,64
	600	51,30
	300	60,11
95	400	51,85
	500	47,18
	600	50,79
	300	57,54
	400	43,03
	500	61,17
	600	61,69

3.1. Pengaruh Suhu Terhadap Persen Ekstraksi Nikel

Hubungan antara suhu terhadap persen ekstraksi nikel disajikan pada gambar 1. Pada gambar tersebut diketahui variabel suhu berpengaruh terhadap nilai persen ekstraksi nikel (Ni) pada proses pelindian.

Berdasarkan Gambar 1, secara umum terlihat bahwa persentase ekstraksi nikel meningkat seiring dengan kenaikan suhu dari 65°C hingga 95°C. Peningkatan ini disebabkan oleh peningkatan energi kinetik molekul pada suhu yang lebih tinggi, sehingga mempercepat laju reaksi pelindian, meningkatkan difusi ion logam, dan memperbesar kelarutan nikel dalam larutan pelindi, dalam hal ini asam sitrat [15]. Namun, pada kondisi tertentu, terjadi fluktuasi efisiensi ekstraksi, seperti yang terlihat pada suhu 95°C dengan kecepatan pengadukan 400 rpm. Persentase ekstraksi justru mengalami penurunan dibandingkan suhu sebelumnya. Fenomena ini terjadi karena degradasi termal asam sitrat pada suhu tinggi, yang mengurangi efektivitasnya sebagai agen pelindih. Hal ini sejalan dengan temuan Astuti et al. (2015) [18] yang menyatakan bahwa efisiensi pelindian nikel memang

meningkat dengan suhu, namun hanya sampai titik optimum tertentu. Setelah melewati suhu tersebut, efisiensi cenderung menurun akibat kerusakan senyawa pelindih.



Gambar 1. Grafik pengaruh suhu terhadap persen ekstraksi

Pada kecepatan pengadukan 300 rpm, persen ekstraksi nikel menunjukkan tren meningkat, terutama pada rentang suhu 65–85°C, dengan nilai tertinggi sebesar 60,11% pada suhu 85°C. Namun, terjadi penurunan pada suhu 95°C menjadi 57,54%, yang mengindikasikan bahwa kisaran suhu optimum untuk kecepatan ini adalah 65–85°C.

Pada 400 rpm, tren ekstraksi cenderung tidak stabil. Ekstraksi tertinggi tercatat pada suhu 75°C dan 85°C dengan nilai sekitar 51,85%, tetapi penurunan tajam terjadi pada suhu 65°C (34,22%) dan 95°C (43,03%). Hal ini dapat dikaitkan dengan kondisi sistem yang berada dalam zona transisi, dimana kecepatan pengadukan cukup tinggi untuk mempengaruhi turbulensi namun belum cukup untuk mempercepat perpindahan massa secara efisien [18].

Sementara itu, pada kecepatan 500 rpm dan 600 rpm, ekstraksi nikel meningkat secara konsisten seiring naiknya suhu. Pada kecepatan 500 rpm, ekstraksi tertinggi terjadi pada suhu 95°C sebesar 61,17%, dan pada 600 rpm, tertinggi mencapai 61,69%. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi suhu tinggi dan kecepatan pengadukan tinggi mampu meningkatkan frekuensi tumbukan molekul, mempercepat reaksi [19][20], dan mengatasi hambatan difusi pada permukaan partikel logam [21]. Secara umum, hasil penelitian ini konsisten dengan teori kinetika pelindian, dimana kenaikan suhu dan pengadukan mempercepat reaksi hingga titik optimum. Akan tetapi, jika salah satu variabel terutama suhu melebihi batas optimal, efektivitas pelindian dapat

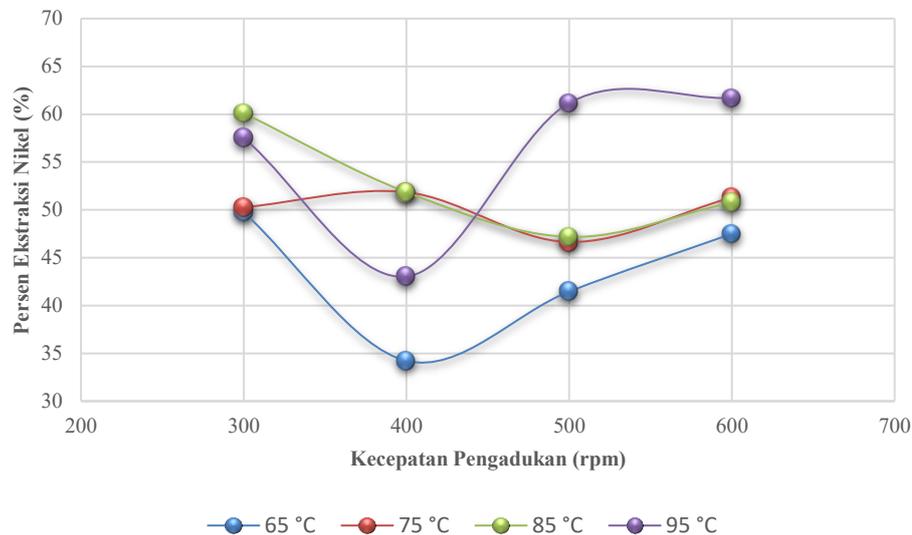
menurun karena reagen menjadi tidak stabil atau terbentuknya lapisan pasif pada permukaan logam.

Dari pembahasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa suhu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses ekstraksi nikel dilakukan. Namun, persentase ekstraksi berbeda tergantung pada suhu yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi pengoperasian yang ideal untuk ekstraksi nikel tidak hanya tergantung pada suhu. Secara umum, suhu yang lebih tinggi meningkatkan efisiensi ekstraksi nikel. Ini terutama berlaku untuk 95°C. Hal ini relevan dengan yang dilakukan oleh Qulub Al Asrori et al (2022) [22] yang menemukan bahwa jumlah nikel yang diekstrak dari bijih laterit meningkat dengan suhu yang digunakan. Perolehan persentase ekstraksi nikel tertinggi sebesar 61,69% pada suhu 95°C menunjukkan bahwa suhu tinggi meningkatkan efektivitas asam sitrat dalam melarutkan nikel dari bijih laterit. Hal ini sejalan dengan prinsip kinetika reaksi, dimana peningkatan suhu mempercepat laju reaksi kimia dan meningkatkan difusi ion logam ke dalam larutan pelindian. Penelitian oleh Astuti et al. (2015) [18] juga menunjukkan bahwa suhu optimal untuk pelindian nikel menggunakan asam sitrat berada pada kisaran 90°C, dengan konsentrasi asam 1 M dan waktu pelindian selama 15 hari, menghasilkan perolehan nikel hingga 95,6%. Hal ini menegaskan bahwa suhu tinggi, dalam batas tertentu, dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi nikel. Suhu yang lebih tinggi dapat membantu memecah atau mencegah pembentukan lapisan pasif, sehingga meningkatkan volume asam yang efektif [23]. Dengan peningkatan

jumlah asam, memberikan ketersediaan asam yang lebih besar untuk melarutkan logam, sehingga ekstraksi logam yang diperoleh meningkat. Peningkatan jumlah asam sitrat selama proses pelindian menghasilkan peningkatan jumlah ion hidrogen (H^+) yang dihasilkan pada tahap disosiasi asam [24]. Namun, hal yang perlu diperhatikan adalah peningkatan suhu di atas titik optimal dapat menyebabkan degradasi termal asam sitrat, yang justru menurunkan efisiensi pelindian. Oleh karena itu, penentuan suhu optimal sangat penting untuk memaksimalkan perolehan nikel tanpa merusak struktur kimia pelarut.

3.2. Pengaruh Suhu Terhadap Persen Ekstraksi Nikel

Hubungan antara kecepatan pengadukan terhadap persen ekstraksi nikel dapat dilihat pada



Gambar 2. Grafik pengaruh kecepatan pengadukan terhadap persen ekstraksi

Penurunan pada 400 rpm disebabkan pada kondisi ini kecepatan pengadukan berada diantara terlalu lambat dan terlalu cepat, sehingga menghasilkan turbulensi yang cukup mengganggu proses pelarutan atau kontak antara larutan dan padatan, seperti menyebabkan suspensi tidak stabil, sehingga mengurangi efektivitas ekstraksi [25]. Sementara kecepatan 300 rpm, lapisan *boundary layer* masih cukup stabil sehingga difusi ion Ni optimal sehingga persen ekstraksi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan 400 rpm yang pengadukannya terlalu cepat justru mengganggu lapisan ini dan memperlambat transfer massa [26]. Sedangkan pada pengadukan 500 dan 600 rpm, ekstraksi mulai membaik kembali, karena turbulensi dan kontak massanya sudah lebih maksimal.

gambar 2. Terlihat bahwa variabel kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap nilai persen ekstraksi nikel (Ni) pada proses pelindian. Meskipun efeknya bergantung pada suhu pelindian.

Kecepatan pengadukan dalam proses pelindian berperan penting dalam meningkatkan kontak antara partikel bijih dan pelarut, serta mencegah terjadinya pengendapan partikel padat di dasar reaktor [9]. Secara umum, grafik menunjukkan bahwa pada kecepatan pengadukan yang lebih tinggi, peningkatan suhu memberikan pengaruh yang lebih nyata terhadap peningkatan persen ekstraksi. Namun, terjadi penurunan pada kecepatan pengadukan 400 rpm.

Pada suhu 95°C, peningkatan kecepatan pengadukan dari 300 rpm ke 600 rpm menghasilkan kenaikan ekstraksi yang signifikan dari sekitar 48% menjadi hampir 65%, yang menunjukkan bahwa kecepatan pengadukan kuat mendukung kinetika pelindian. Sebaliknya, pada suhu rendah seperti 65°C, perubahan kecepatan pengadukan hanya menunjukkan pengaruh yang relatif kecil terhadap peningkatan ekstraksi, mengindikasikan bahwa suhu menjadi faktor pembatas utama dalam pelindian pada kondisi ini karena reaksi pelindian tidak berlangsung optimal meskipun pengadukan ditingkatkan. Peningkatan pengadukan memperbaiki transfer massa ion dalam larutan, yang berdampak langsung pada efisiensi reaksi pelindian [27].

Dari hasil yang diperoleh diketahui bahwa kecepatan pengadukan mempengaruhi hasil

ekstraksi nikel laterit karena meningkatkan homogenisasi campuran dan laju difusi ion H^+ ke permukaan bijih, dimana persen ekstraksi optimal yang diperoleh adalah 61,69% pada kecepatan pengadukan 600 rpm dengan suhu 95°C. Namun, persen ekstraksi nikel yang diperoleh bergantung pada variasi tertentu, pengadukan yang terlalu besar dapat menyebabkan perpindahan massa lebih rendah, yang menyebabkan pergerakan molekul yang lebih kuat pada campuran, yang mengakibatkan pelepasan ion Ni^{+2} pada bijih nikel laterit.

4. KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa suhu dan kecepatan pengadukan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi ekstraksi nikel dari bijih laterit menggunakan pelarut asam sitrat. Suhu tinggi meningkatkan laju reaksi pelindian melalui peningkatan energi kinetik dan difusi ion, sementara pengadukan yang optimal memperbaiki homogenisasi larutan dan transfer massa. Kombinasi suhu 95°C dan kecepatan pengadukan 600 rpm menghasilkan persen ekstraksi tertinggi sebesar 61,69%. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan kondisi operasi yang tepat sangat penting untuk memaksimalkan proses pelindian nikel secara efisien dan ramah lingkungan. Sebagai tindak lanjut, disarankan agar penelitian selanjutnya mengeksplorasi pengaruh parameter lain yang juga berpotensi memengaruhi efisiensi ekstraksi, seperti konsentrasi pelarut (asam sitrat), rasio padat-cair, dan waktu pelindian. Evaluasi terhadap interaksi antar parameter tersebut dapat memberikan wawasan lebih mendalam dalam mengoptimalkan kondisi proses pelindian secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Politeknik Industri Logam Morowali, atas fasilitas dan dukungan teknis yang telah diberikan selama proses penelitian ini berlangsung. Dukungan moral dan material dari keluarga turut menjadi bagian penting dalam keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Septiawan, J. Justadi, D. P. Sari, V. S. Nugroho, and M. I. Rianto, "Pengendapan nikel sulfat hasil pelindian bijih nikel laterit (limonit) menggunakan metode Solvent Displacement Crystallization (SDC)," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 17, no. 2, pp. 206–212, Dec. 2023, doi: 10.22146/jrekpros.83282.
- [2] USGS, "U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries," 2022. Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-nickel.pdf>
- [3] F. Bahfie, A. Manaf, W. Astuti, F. Nurjaman, and U. Herlina, "Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 17, no. 3, pp. 135–152, Sep. 2021, doi: 10.30556/jtmb.Vol17.No3.2021.1156.
- [4] A. Arif And D. E. Herianto, "Kendala Dan Kemungkinan Pengembangan Proses Caron Untuk Bijih Nikel Laterit Kadar Rendah Indonesia," *Metalurgi*, Pp. 7–14, 2015.
- [5] M. A. Faiz, S. Sufriadin, and S. Widodo, "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*, vol. 24, no. 1, pp. 93–99, Oct. 2020, doi: 10.25042/jpe.052020.13.
- [6] W. Wahab *et al.*, "Studi Pengaruh Variabel Proses dan Kinetika Ekstraksi Nikel dari Bijih Nikel Laterit Menggunakan Larutan Asam Sulfat pada Tekanan Atmosferik," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 15, no. 1, p. 37, Jun. 2021, doi: 10.22146/jrekpros.61533.
- [7] W. Astuti, T. Hirajima, K. Sasaki, and N. Okibe, "Comparison of effectiveness of citric acid and other acids in leaching of low-grade Indonesian saprolitic ores," *Miner Eng*, vol. 85, pp. 1–16, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.mineng.2015.10.001.
- [8] H. L. Carpen and E. C. Giese, "Enhancement of nickel laterite ore bioleaching by Burkholderia sp. using a factorial design," *Appl Water Sci*, vol. 12, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.1007/s13201-022-01704-5.
- [9] R. Tri Jayanti and Yusdianto, "Effect of Agitation Speed and Leaching Time for Nickel Recovery of Morowali Limonite Ore in Atmospheric Citric Acid Leaching," *FoITIC*, vol. 2, pp. 48–52, 2020.
- [10] F. Aryanhi and R. T. Jayanti, "Enhancing the Nickel Recovery of Morowali Nickel Laterite in Atmospheric Citric Acid Leaching," *FoITIC*, vol. 2, no. 1, pp. 38–42, 2020.
- [11] E. Febriana, A. Tristiyan, W. Mayangsari, And A. B. Prasetyo, "Kinetika Dan

- Mekanisme Pelindian Nikel Dari Bijih Limonit Pengaruh Waktu Dan Temperatur,” *Metalurgi*, Vol. 2, Pp. 61–68, 2018.
- [12] A. Y. Nurfaidah, D. P. Lestari, R. T. Azzahra, And D. Ratna Suminar, “Kajian Pustaka Pengaruh Suhu Dan Konsentrasi Terhadap Proses Pemisahan Nikel Dari Logam Pengotor Menggunakan Metode Leaching,” *Jurnal Fluida*, Vol. 13, No. 2, Pp. 81–92, 2020.
- [13] W. Ismayanti *Et Al.*, “Pengaruh Variabel Pelindian Terhadap Ekstraksi Nikel Dalam Pelindian Bijih Nikel Laterit,” *Jurnal Sains Dan Teknologi*, Vol. 10, No. 2, Pp. 127–134, 2021.
- [14] M. A. Albar J, Ardiansah, and I. Nuhardin, “Analisa Pengaruh Ukuran Partikel Ore Terhadap Persen Recovery Nikel Laterit Dengan Pelarut Asam Sitrat,” *Dewantara. J. Tech*, Vol. 4, Pp. 01–05, 2023.
- [15] S. Kursunoglu and M. Kaya, “Atmospheric pressure acid leaching of Caldag lateritic nickel ore,” *Int J Miner Process*, vol. 150, pp. 1–8, May 2016, doi: 10.1016/j.minpro.2016.03.001.
- [16] A. Idrus, S. Pramumijoyo, I. Wayan Warmada, and A. Imai, “Study On Mineralogy and Chemistry Of The Saprolitic Nickel Ores From Soroako, Sulawesi, Indonesia: Implication For The Lateritic Ore Processing,” *J. Se Asian Appl. Geol*, Vol. 3, No. 1, Pp. 23–33, 2011.
- [17] Y. Choi, I. Lee, and I. Moon, “Geochemical and Mineralogical Characteristics of Garnierite From the Morowali Ni-Laterite Deposit in Sulawesi, Indonesia,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/feart.2021.761748.
- [18] W. Astuti, T. Hirajima, K. Sasaki, and N. Okibe, “Kinetics of nickel extraction from Indonesian saprolitic ore by citric acid leaching under atmospheric pressure,” *Minerals and Metallurgical Processing*, vol. 32, no. 3, pp. 176–185, Aug. 2015, doi: 10.1007/bf03402286.
- [19] W. Xiao, X. Liu, and Z. Zhao, “Kinetics Of Nickel Leaching From Low-Nickel Matte In Sulfuric Acid Solution Under Atmospheric Pressure,” *Hydrometallurgy*, Vol. 194, Jun. 2020, Doi: 10.1016/J.Hydromet.2020.105353.
- [20] M. Laubertová, O. Velgosova, M. Sisol, and T. Vindt, “Study of Hydrometallurgical Treatment of Metal-Bearing Material from Environmental Burdens Containing Iron, Chromium, Nickel, and Cobalt,” *Minerals*, vol. 14, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/min14100968.
- [21] K. K. Mamyrbayeva, A. N. Kuandykova, T. A. Chepushtanova, and Y. S. Merkibayev, “Review on hydrometallurgical processing technology of lateritic nickel ore for the last 20 years in the world,” *Non-ferrous Metals*, vol. 56, no. 1, pp. 13–21, 2024, doi: 10.17580/nfm.2024.01.03.
- [22] T. Qulub Al Asrori *Et Al.*, “Ekstraksi Nikel Dari Bijih Nikel Laterit Sorowako Dengan Asam Nitrat,” *Inovasi Teknik Kimia*, Vol. 7, No. 2, Pp. 53–57, 2022.
- [23] K. M. Emran, S. T. Arab, A. M. Al-Turkustani, and H. A. Al-Turaif, “Temperature Effect On The Corrosion And Passivation Characterization Of Ni82.3cr7fe3si4.5b3.2 Alloy In Acidic Media,” *International Journal Of Minerals, Metallurgy And Materials*, Vol. 23, No. 2, Pp. 205–214, Feb. 2016, Doi: 10.1007/S12613-016-1228-X.
- [24] K. Cleary Wanta *et al.*, “Uji Validitas Model Shrinking Core terhadap Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat dalam Proses Leaching Nikel Laterit,” *Jurnal Rekayasa Proses*, Vol. 11, No. 1, Pp. 30–35, 2017.
- [25] R. Shiba, M. A. Uddin, Y. Kato, and S. Y. Kitamura, “Solid/liquid mass transfer correlated to mixing pattern in a mechanically-stirred vessel,” *ISIJ International*, vol. 54, no. 12, pp. 2754–2760, 2014, doi: 10.2355/isijinternational.54.2754.
- [26] I. Ayranci, S. Kresta, J. Shen, and N. Semagina, “Negative impact of high stirring speed in laboratory-scale three-phase hydrogenations,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 53, no. 42, pp. 16231–16238, 2014.
- [27] J. Li, D. Xiong, H. Chen, R. Wang, and Y. Liang, “Physicochemical factors affecting leaching of laterite ore in hydrochloric acid,” *Hydrometallurgy*, vol. 129–130, pp. 14–18, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.hydromet.2012.08.001.