

Available online at: <http://reactor.poltekattipdg.ac.id/>

REACTOR

Journal of Research on Chemistry and Engineering

| ISSN Online 2746-0401 |



Kinetika *Leaching* Ni dan Fe dari Bijih Laterit Tipe *Limonite* Morowali

Gyan Prameswara ¹, Flaviana Yohanala Prista Tyassena ¹, Monita Pasaribu ^{1,2}, Indhyca Novitha Febryanzha ¹

¹ Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar, Jl. Sunu No. 220, Kota Makassar, 90211, Indonesia

² Program Studi Teknologi Proses Industri Kimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Jl. Raya Karang Bolong, Banten, 42166, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: July 28, 2022

Revised: December 15, 2022

Available online: December 22, 2022

KEYWORDS

Iron, Kinetic, Leaching, Nickel, Zhuravlev Model

CORRESPONDENCE

Name: Gyan Prameswara

E-mail: gyan@atim.ac.id

A B S T R A C T

Nickel (Ni) deposits are depleting, while demand for the metal is increasing. To address this problem, valuable metals such as Ni and Fe can be extracted from secondary sources such as limonite-type laterite ores. The goal of this study was to investigate the influence of leaching temperature on Ni and Fe recovery, as well as the best kinetic model to represent the leaching process of these metals. Temperature has a considerable impact on the leaching process of Ni and Fe. Increasing the temperature from 30 to 90 °C can increase the recovery of Ni by 50% and Fe by 70 %. Ni and Fe recoveries were highest at 93.21 % and 95 %, respectively. Kinetic analysis of the two metals' leaching processes was also performed. It was discovered that the diffusion process controls Ni leaching, which can be represented using the Zhuravlev kinetic model, whereas chemical reactions on the surface of the unreacted core controls Fe leaching. The activation energies for leaching Ni and Fe are 36.53 and 40.32 kJ/mol, respectively. $1930 \exp((-36.53 \text{ kJ/mol})/(R.T))t = [(1-X)^{-1/3} - 1]^2$ is the kinetic equation for Ni leaching. The kinetic equation for Fe leaching is $3903 \exp((-40.32 \text{ kJ/mol})/(R.T))t = 1 - (1-X)^{1/3}$.

PENDAHULUAN

Nikel merupakan logam strategis yang dimanfaatkan untuk aplikasi yang luas. Salah satu aplikasi tersebut ialah untuk *precursor* katoda baterai litium yang menjadi topik hangat ketika ide mengenai kendaraan listrik muncul. Hal ini dikarenakan logam ini merupakan logam penyusun katoda dengan kadar mencapai 30% komponen baterai kendaraan listrik [1] [2]. Kebutuhan akan logam ini semakin meningkat tiap tahunnya namun keberadaan pada sumber primer seperti bijih nikel sulfida semakin menipis. Diketahui sebanyak 30% cadangan nikel dunia berasal dari tipe bijih sulfida, sedangkan sisanya berada pada tipe bijih oksida seperti yang terdapat pada mineral *goethite* [3]–[6]. Penelitian mengenai proses ekstraksi *leaching* logam-logam berharga dari mineral *goethite* semakin marak dilakukan, salah satunya proses *leaching* untuk melindih logam-logam seperti Ni dan Fe menjadi *pregnant leach solution* (PLS) [7]–[10]. Proses optimasi

dan kinetika menjadi faktor kunci untuk ekstraksi logam-logam tersebut.

Proses ekstraksi nikel dan besi dari mineral *goethite* dapat dilakukan melalui rute pirometalurgi ataupun hidrometalurgi. Proses pirometalurgi hanya efisien untuk mengekstrak nikel dengan kadar yang tinggi pada bijih. Pembuangan gas SO_x juga menjadi masalah lain yang ditimbulkan pada proses ini. Proses hidrometalurgi lebih cocok dipakai untuk *ore* dengan kadar nikel yang rendah. Kadar nikel pada mineral *goethite* berkisar antara 0.8-1.9 %. Proses hidrometalurgi biasanya dilakukan dengan proses *leaching* diikuti dengan pengendapan dan kalsinasi untuk mendapatkan nikel oksida. Proses ini dinilai lebih menguntungkan dan membutuhkan *capital expense* lebih kecil dibanding proses pirometalurgi, dengan kata lain lebih ekonomis. Proses *direct leaching* banyak dilakukan untuk mengekstrak logam-logam berharga dari mineral *goethite*, salah satunya menggunakan asam. Asam-asam yang digunakan

merupakan asam mineral yang memiliki valensi asam tinggi seperti asam hipoklorit, asam sulfida, asam klorida, selain itu *leaching* juga dapat dilakukan menggunakan asam organik dan asam yang dihasilkan dari mikroorganisme (*bioleaching*). Dalam banyak penelitian disebutkan bahwa asam sulfat banyak dipakai karena persen ekstraksi logam yang tinggi dan karena harga asam yang rendah serta sudah tersedia secara luas. Selain hal tersebut, asam sulfat juga banyak dilakukan karena kemampuan total ekstraksinya terhadap logam-logam seperti Fe, Ni, dan Ti, sehingga memudahkan proses berikutnya seperti proses. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan asam sulfat sebagai reagen untuk melarutkan logam-logam berharga dari mineral *goethite*.

Kinetika proses *leaching* merupakan aspek penting dalam pengembangan proses pada skala yang lebih besar. Studi kinetika terhadap proses *leaching* Ni dan Fe sudah banyak dilakukan. Agacayak dkk. melaporkan bahwa *leaching* Ni dari bijih *laterite* dikontrol oleh proses difusi melalui lapisan abu memakai model *shrinking core* (SCM) [8]. Nasab dkk. pada penelitiannya melaporkan bahwa *leaching* Ni dan Co dari *iron-rich laterite* dikontrol oleh proses reaksi kimia pada permukaan padatan (SCM) dengan nilai energi aktivasi (E_A) 59.54 kJ/mol [11]. Olanipekun menyampaikan bahwa *leaching* Fe dari bijih *laterite* dikontrol oleh proses difusi (SCM) dengan E_A 71.7 kJ/mol [12]. Penelitian serupa juga dilaporkan oleh MacCarthy dkk., *leaching* Ni dan Co dari bijih *laterite* tipe *saprolite* dikontrol oleh reaksi kimia (SCM) pada permukaan padatan [13]. Belum ada yang melakukan studi kinetika *leaching* bijih *laterite* menggunakan model kinetika berbasis difusi yang dikembangkan oleh [14]. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian mendetail terhadap model berbasis difusi dan campuran seperti model Jander, Dickinson, dan Zhuravlev. Penelitian ini bertujuan untuk mencari model kinetika paling cocok dengan membandingkan model berbasis difusi dan campuran terhadap SCM.

Studi kinetika reaksi dan mekanisme pelarutan dibutuhkan untuk memprediksi perilaku proses *leaching* logam dari mineral. Proses *leaching* biasanya dipengaruhi oleh lima proses yaitu (1) proses difusi pelarut melalui lapisan film, (2) proses difusi pelarut melalui lapisan abu, (3) proses reaksi pelarut dengan logam, (4) difusi PLS melalui lapisan abu, dan (5) difusi PLS melalui lapisan film kembali ke badan pelarut [15]. Pada keadaan proses *leaching* menggunakan pengadukan cepat, efek transfer massa pada proses (1) dan (5) dapat diabaikan [16]. Perilaku model kinetika *leaching* ini ditentukan berdasarkan proses mana yang memiliki waktu tinggal paling lama. Model kinetika yang banyak dipakai untuk mendeskripsikan jalannya proses *leaching*

adalah dengan menggunakan *shrinking core model* (Persamaan s1-2) [14] [17].

Proses difusi melalui lapisan abu:

$$k_1 t = 1 - 3(1 - X)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X) \quad (1)$$

Proses reaksi:

$$k_2 t = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Selain dua persamaan kinetika tersebut, dikembangkan juga model-model kinetika lain untuk proses difusi seperti persamaan Jander (Persamaan 3), Dickinson (Persamaan 4) dan Zhuravlev (Persamaan 5).

Jander:

$$k_3 t = \left(1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}}\right)^2 \quad (3)$$

Dickinson:

$$k_4 t = \left(\frac{1}{(1 - X)^{\frac{1}{3}}} - 1\right) \quad (4)$$

Zhuravlev:

$$k_5 t = \left((1 - X)^{-\frac{1}{3}} - 1\right)^2 \quad (5)$$

Dimana k_{1-5} merupakan konstanta kecepatan reaksi untuk proses difusi melalui lapisan abu, reaksi, Jander, Dickinson dan Zhuravlev, berurutan. t merupakan durasi *leaching* (menit) dan X adalah fraksi logam pada PLS.

METODOLOGI

Material dan Pengujian

Bijih laterit tipe limonit didapatkan dari Morowali (Sulawesi Tengah). Sampel kemudian digerus menggunakan *ball mill* skala laboratorium dan dilakukan pengayakan menggunakan Ristech Test Sieve. Sampel yang memiliki ukuran $< 180 \mu\text{m}$ digunakan untuk proses *leaching* pada tekanan atmosferik. Asam sulfat (*grade p.a.*) dan akuades digunakan untuk proses *leaching*. Pengujian umpan dan residu dilakukan menggunakan *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence* (EDXRF) Epsilon 1, Panalytical.

Proses Leaching

Proses *leaching* dilakukan di dalam labu leher tiga 500 mL dilengkapi dengan kondensor dan termometer. Proses pemanasan dilakukan menggunakan *external hotplate* yang dilengkapi dengan *stirrer*. Proses *leaching* dilakukan pada rentang temperatur 30-90 °C dan pada rentang durasi *leaching* 0-120 menit. Larutan sulfat 2 M serta rasio *ore*/pelarut sebesar 10 gram/100 mL dan kecepatan pengadukan 200 rpm dipakai untuk setiap pengambilan data. Proses pemisahan *solid/liquid* dilakukan menggunakan filtrasi vakum. Residu *leaching* kemudian dicuci menggunakan akuades 100 mL pada temperatur 80 °C untuk melindih sisa asam dan PLS yang masih tertinggal, kemudian dilakukan penyaringan dan pengeringan residu. Residu kering kemudian dianalisis

menggunakan EDXRF untuk mengetahui konsentrasi Fe dan Ni yang masih ada di dalamnya. Rekoveri dan fraksi Fe dan Ni didapatkan melalui perhitungan menurut Persamaan (6-7).

$$R(\%) = \frac{m_0 C_0 - m_i C_i}{m_0 C_0} \times 100 \quad (6)$$

$$X = \frac{R}{100} \quad (7)$$

Dimana R adalah rekoveri logam, m_0 adalah masa umpan (gram), C_0 adalah konsentrasi logam di umpan (%), m_i adalah massa residu *leaching* (gram), C_i adalah konsentrasi logam di residu (%) dan X adalah fraksi logam pada filtrat.

Evaluasi Kinetika

Studi kinetika dilakukan dengan membuat plot t vs persamaan model kinetika. Model kinetika paling cocok ditentukan melalui nilai faktor korelasi (R^2) yang paling tinggi. Nilai konstanta kecepatan reaksi didapatkan dari *slope* plot t vs persamaan model kinetika. Nilai energi aktivasi (E_A) dan faktor frekuensi (A) juga ditentukan menggunakan persamaan Arrhenius (Persamaan 8-9). Nilai E_A dan A didapatkan dari intersep plot $1/T$ vs $\ln k$.

$$k = A \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{R T} \quad (9)$$

Dimana k merupakan konstanta kecepatan reaksi dari model kinetika yang paling cocok, A adalah faktor frekuensi, E_A adalah energi aktivasi (kJ/mol), R adalah konstanta gas (8.3145 J/(mol K)) dan T merupakan temperatur absolut (K).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Bijih Goethite

Karakterisasi dan benefisi mineral telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Sampel dengan tipe bijih *limonite* digunakan pada penelitian ini. Ciri khas dari bijih tipe *limonite* adalah memiliki kadar Fe tinggi dan Mg yang rendah. Kadar Ni, Fe dan Mg berurutan sebesar 1.9%, 13.82% dan 5.13%. Proses *grinding* menggunakan *ball mill* dengan berbagai kondisi operasi terbukti dapat mereduksi ukuran sampel hingga nilai P_{50} mencapai <180 μm . Komposisi mineral pembawa Ni dan Fe seperti *goethite* ((Fe,Ni)OOH) dan hematite (Fe_2O_3) terdapat sebanyak 16.79% dan 8.41% pada sampel [18] [19].

Proses Leaching

Proses *leaching* diilustrasikan pada Gambar 1. Hasil rekoveri logam Ni dan Fe dari proses *leaching* pada konsentrasi asam sulfat 2 M, rasio *ore*/pelarut sebesar 10 gram/100 mL dan 200 rpm tersaji pada Gambar 2. Dari data tersebut terlihat bahwa suhu memainkan peran penting pada proses *leaching* kedua logam tersebut. Rekoveri Ni dan Fe naik signifikan pada rentang durasi

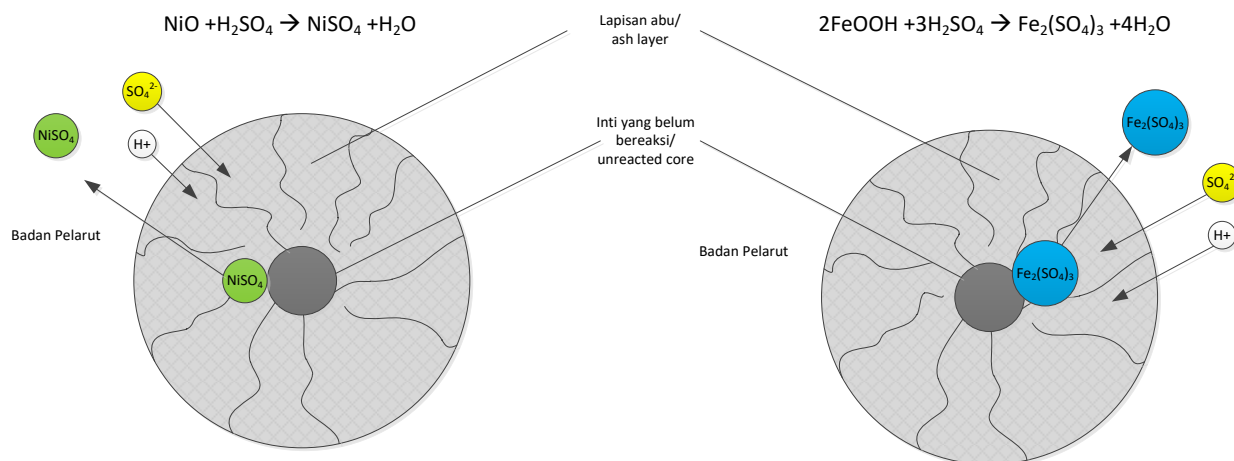
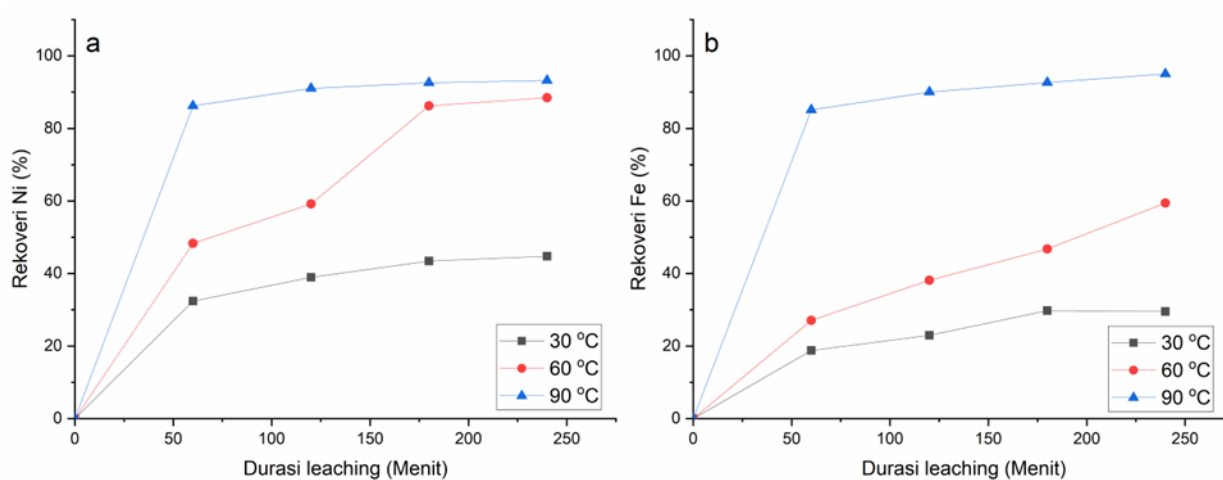
leaching 0-60 menit kemudian mencapai kesetimbangan setelahnya. Tercatat rekoveri Ni dan Fe sebesar 93.21% dan 95%, berurutan. Pada suhu 60 °C, rekoveri kedua logam masih belum mencapai puncaknya, terjadi kenaikan signifikan pada rentang durasi *leaching* 0-180 menit untuk logam Ni sedangkan rekoveri logam Fe terus meningkat. Temperatur yang lebih tinggi akan meningkatkan gerakan molekul dan mereduksi viskositas dari larutan produk (PLS), yang akan memudahkan proses ekstraksi. Dengan kata lain, konduktivitas, transfer massa dan juga difusifitas meningkat dengan meningkatnya temperatur [16].

Evaluasi Kinetika

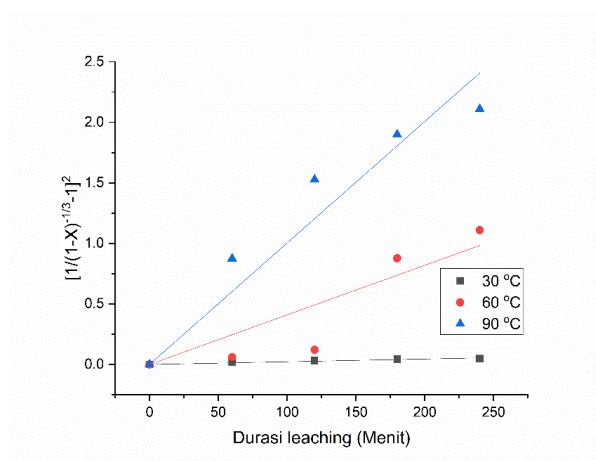
Kecepatan proses *leaching* biasanya dikontrol oleh salah satu proses yaitu (1) difusi melalui lapisan film, (2) difusi melalui lapisan abu/*ash layer*, (3) reaksi kimia pada inti yang belum bereaksi, (4) difusi produk melalui lapisan abu/*ash layer* dan (5) difusi produk melalui lapisan film. Kecepatan proses *leaching* dikontrol oleh langkah yang paling lama dari kelima proses tersebut. Langkah (1) dan (5) dapat diabaikan jika terdapat proses pengadukan. Terdapat dua proses umum yaitu reaksi pada inti yang belum bereaksi dan proses difusi. Pada penelitian ini dilakukan evaluasi terhadap satu model kinetika reaksi kimia dan empat model difusi. Model dievaluasi melalui nilai faktor korelasi (R^2). Terlihat pada Tabel 1 nilai R^2 model reaksi tidak lebih tinggi dibanding model difusi untuk kedua proses *leaching* Ni, sedangkan model kinetika reaksi kimia lebih cocok untuk *leaching* Fe. Model Zhuravlev dan reaksi kimia (SCM) kemudian dipilih sebagai model kinetika yang paling cocok berdasarkan nilai R^2 untuk kedua proses *leaching* Ni dan Fe, secara berurutan.

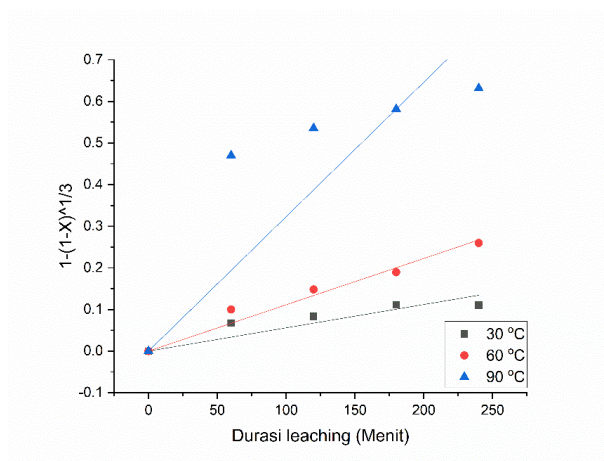
Tabel 1. Rangkuman model kinetika *leaching*

Jenis Model Kinetika	Suhu (°C)	Ni		Fe	
		k (slope)	R^2	k (slope)	R^2
Reaksi kimia	30	9.24×10^{-4}	0.92	5.59×10^{-4}	0.94
	60	23.4×10^{-4}	0.98	11.1×10^{-4}	0.99
	90	31.6×10^{-4}	0.88	32.3×10^{-4}	0.97
Difusi lapisan abu	30	4.13×10^{-4}	0.97	1.61×10^{-4}	0.98
	60	21.9×10^{-4}	0.97	6.1×10^{-4}	0.98
	90	33.5×10^{-4}	0.90	34.4×10^{-4}	0.93
Jander (difusi)	30	1.55×10^{-4}	0.97	0.57×10^{-4}	0.97
	60	10.7×10^{-4}	0.95	2.39×10^{-4}	0.97
	90	18.1×10^{-4}	0.92	18.9×10^{-4}	0.95
Dickinson (difusi)	30	11.1×10^{-4}	0.93	6.24×10^{-4}	0.95
	60	44.2×10^{-4}	0.97	14.2×10^{-4}	0.99
	90	74.2×10^{-4}	0.93	79×10^{-4}	0.96
Zhuravlev (difusi)	30	2.25×10^{-4}	0.98	0.72×10^{-4}	0.95
	60	40.9×10^{-4}	0.90	4.05×10^{-4}	0.92
	90	100.3×10^{-4}	0.97	116.7×10^{-4}	0.99

Gambar 1. Ilustrasi proses *leaching* Ni dan Fe dari mineral *goethite* pada tipe bijih limonitGambar 2. Rekoveri (a) Ni dan (b) Fe (2 M H_2SO_4 , 10 gram/100 mL, 200 rpm)

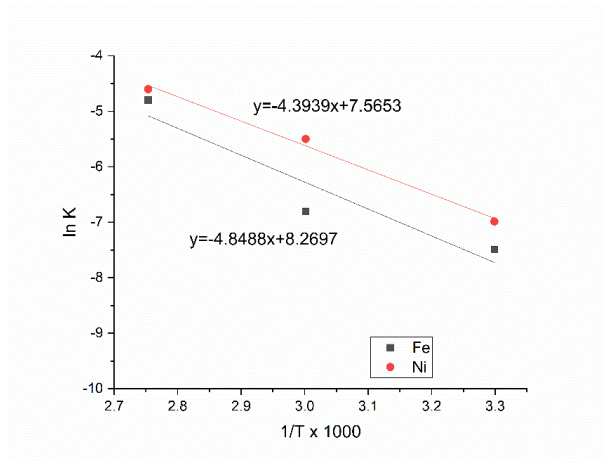
Nilai konstanta kecepatan reaksi yang didapatkan dari model difusi Zhuravlev dan reaksi kimia kemudian digunakan untuk menentukan nilai energi aktivasi (E_A) dan faktor frekuensi (A). Plot $[1/(1-X)^{-1/3}-1]^2$ vs durasi *leaching* untuk proses *leaching* Ni, sedangkan plot $1-(1-X)^{1/3}$ vs durasi *leaching* digunakan untuk *leaching* Fe. Gambar 3 dan 4 menyajikan kedua plot tersebut, dimana menunjukkan kecocokan yang baik. Berdasarkan data ini proses difusi merupakan proses yang mengontrol jalannya *leaching* Ni sedangkan proses reaksi kimia mengontrol jalannya *leaching* Fe pada kondisi operasi yang dipakai. Hal ini juga dilaporkan oleh Astuti dkk. [20], bahwa proses *leaching* Ni dari bijih laterit menggunakan asam dikontrol oleh proses difusi.

Gambar 3. Model kinetika Zhuravlev vs t untuk *leaching* Ni



Gambar 4. Model kinetika Zhuravlev vs t untuk *leaching* Fe

Energi aktivasi (E_A) dan faktor frekuensi (A) dihitung melalui persamaan Arrhenius (Persamaan 8-9) dengan melakukan *plotting* $1/T$ vs $\ln k$. *Slope* dari plot ini merupakan nilai $-E_A/R$ sedangkan intersepnya merupakan nilai $\ln A$. Regresi linear untuk plot $1/T$ vs $\ln k$ untuk Ni dan Fe pada Gambar 5 menunjukkan kecocokan yang baik. Nilai faktor korelasi (R^2) untuk Ni dan Fe sebesar 0.99 dan 0.90, berurutan. Nilai Energi aktivasi sebesar 36.53 kJ/mol dan 40.32 kJ/mol untuk proses *leaching* Ni dan Fe menggunakan model kinetika Zhuravlev untuk Ni dan reaksi kimia untuk Fe. Nilai energi aktivasi untuk proses *leaching* Ni dan Fe ini juga mengkonfirmasi bahwa jika nilai energi aktivasi <40 kJ/mol menandakan proses tersebut dikontrol oleh proses difusi [9], [12], [20]–[22].



Gambar 5. Plot Arrhenius untuk *leaching* Ni dan Fe

KESIMPULAN

Suhu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap rekoveri logam Ni dan Fe pada proses *leaching*. Rekoveri Ni meningkat sebesar 50% pada rentang kenaikan suhu 30-90 °C. Rekoveri Ni tertinggi sebesar 93.21% dicapai pada suhu 90 °C selama 240 menit. Pada rentang suhu yang sama (30-90 °C), rekoveri Fe meningkat sebanyak

70%. Rekoveri Fe tertinggi (70%) dicapai pada suhu 90 °C selama 240 menit.

Evaluasi kinetika dilakukan dengan memakai lima model yaitu satu model kinetika reaksi kimia dan empat model kinetika difusi. Terlihat bahwa proses *leaching* Ni dikontrol oleh proses difusi (model Zhuravlev) sedangkan *leaching* Fe dikontrol oleh reaksi kimia. Persamaan kinetika untuk *leaching* Ni adalah $1930 \exp((-36.53 \text{ kJ/mol})/(R.T))t = [(1-X)^{1/3} - 1]^2$ sedangkan persamaan kinetika untuk *leaching* Fe adalah $3903 \exp((-40.32 \text{ kJ/mol})/(R.T))t = 1 - (1-X)^{1/3}$.

ACKNOWLEDGEMENT

Terimakasih diucapkan kepada Politeknik ATI Makassar atas *funding* yang diberikan untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Anderson, Y. Lu, O. Heathman, and J. Frasser, "Study on future demand and supply security of nickel for electric vehicle batteries," Luxemburg, 2021. doi: 10.2760/212807.
- [2] M. Ustaoglu and B. Yildiz, "Innovative Green Technology in Turkey: Electric Vehicles' Future and Forecasting Market Share," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 41, no. 11600, pp. 139–146, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.04.018.
- [3] M. E. McRae, "Nickel-Mineral Commodity Summaries, January 2021," New York, 2021.
- [4] D. Dreisinger, "Keynote address: Hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 109, no. 5, pp. 253–271, 2009, [Online]. Available: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2225-62532009000500001&lng=es&nrm=iso
- [5] F. Crundwell, M. Moats, T. Robinson, V. Ramachandran, and W. Davenport, "Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals," pp. 489–534, 2011.
- [6] S. Stopic, B. Friedrich, and R. Fuchs, "Sulphuric acid leaching of the Serbian nickel lateritic ore," *Erzmetall J. Explor. Min. Metall.*, vol. 56, no. 4, pp. 204–209, 2003.
- [7] S. Hidayat, S. Yulianti, D. Anggreini, and S. Bahtiar, "Study of Nickel Leaching Using Sulfuric Acid and Phosphoric Acid on The Selectivity Nickel Ore," *J. Pijar Mipa*, vol. 16, no. 3, pp. 393–396, 2021, doi: 10.29303/jpm.v16i3.2602.
- [8] T. Agacayak, V. Zedef, and A. Aras, "Kinetic study on leaching of nickel from Turkish lateritic ore in nitric acid solution," *J. Cent. South Univ.*,

- vol. 23, no. 1, pp. 39–43, 2016, doi: 10.1007/s11771-016-3046-8.
- [9] W. Luo, Q. Feng, L. Ou, G. Zhang, and Y. Chen, “Kinetics of saprolitic laterite leaching by sulphuric acid at atmospheric pressure,” *Miner. Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 458–462, 2010, doi: 10.1016/j.mineng.2009.10.006.
- [10] S. Javanshir, Z. H. Mofrad, and A. Azargoon, “Atmospheric pressure leaching of nickel from a low-grade nickel-bearing ore,” *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 54, no. 3, pp. 890–900, 2018, doi: 10.5277/ppmp1891.
- [11] M. Hosseini Nasab, M. Noaparast, and H. Abdollahi, “Dissolution optimization and kinetics of nickel and cobalt from iron-rich laterite ore, using sulfuric acid at atmospheric pressure,” *Int. J. Chem. Kinet.*, vol. 52, no. 4, pp. 283–298, 2020, doi: 10.1002/kin.21349.
- [12] E. O. Olanipekun, “Kinetics of leaching laterite,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 60, no. 1, pp. 9–14, 2000, doi: 10.1016/S0301-7516(99)00067-8.
- [13] J. MacCarthy, A. Nosrati, W. Skinner, and 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, doi: 10.1016/j.hydromet.2015.11.004.
- [14] C. F. Dickinson and G. R. Heal, “Solid–liquid diffusion controlled rate equations,” *Thermochim. Acta*, vol. 340–341, pp. 89–103, Dec. 1999, doi: 10.1016/S0040-6031(99)00256-7.
- [15] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3rd ed. Oregon: John Wiley and Sons, 1999. doi: 10.1201/9781420014389.ch11.
- [16] 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, no. April, p. 105353, 2020, doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105353.
- [17] C. F. Dickinson and G. R. Heal, “A review of the ICTAC Kinetics Project, 2000. Part 1. Isothermal results,” *Thermochim. Acta*, vol. 494, no. 1–2, pp. 1–14, 2009, doi: 10.1016/j.tca.2009.05.003.
- [18] H. Hatimah, I. Amin, F. Y. P. Tyassena, and G. Prameswara, “PENGARUH KOMINUSI DENGAN MENGGUNAKAN BALL MILL TERHADAP KARAKTERISTIK ORE NIKEL DARI MOROWALI,” *J. Teknol. Kim. Miner.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–13, 2022, [Online]. Available: <https://journal.atim.ac.id/index.php/jtkm/article/view/19>
- [19] G. Prameswara, F. Y. P. Tyassena, and P. D. C. Perkasa, “EVALUASI SISTEM KOMINUSI PRIMER PADA BENEFISIASI COPPER-BEARING-MINERAL,” *J. Teknol. Kim. Miner.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2022, [Online]. Available: <https://journal.atim.ac.id/index.php/jtkm/article/view/16>
- [20] W. Astuti, T. Hirajima, K. Sasaki, and N. Okibe, “Kinetics of nickel extraction from Indonesian saprolitic ore by citric acid leaching under atmospheric pressure,” *Mining, Metall. Explor.*, vol. 32, no. 3, pp. 176–185, Aug. 2015, doi: 10.1007/BF03402286.
- [21] G. Prameswara, I. Trisnawati, P. Mulyono, A. Prasetya, and H. T. B. M. Petrus, “Leaching Behaviour and Kinetic of Light and Heavy Rare Earth Elements (REE) from Zircon Tailings in Indonesia,” *JOM*, vol. 73, no. 4, pp. 988–998, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11837-021-04584-3.
- [22] G. Prameswara, I. Trisnawati, H. Poernomo, P. Mulyono, A. Prasetya, and H. T. B. M. Petrus, “Kinetics of Yttrium Dissolution from Alkaline Fusion on Zircon Tailings,” *Mining, Metall. Explor.*, vol. 37, no. 4, pp. 1297–1305, Aug. 2020, doi: 10.1007/s42461-020-00220-x.