

Pengaruh *Pre-roasting* Terhadap Kinetika *Leaching* Fe dari *Laterite* Tipe *Limonite* (*Effect Of Pre-roasting On Fe Leaching Kinetics from Limonite-Type Laterite*)

Gyan Prameswara^{1*}

¹Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar

* Korespondensi E-mail: gyan@atim.ac.id

Abstrak

Ekstrak logam berharga dari laterit semakin intensif dilakukan. Kelangkaan sumber sulfida yang mengandung Ni tinggi dan penggunaan proses pirometalurgi dengan capital cost tinggi menjadi alasan penting untuk mulai ekstraksi logam berharga ke mineral oksida seperti laterit dan proses hidrometalurgi seperti *leaching*. Pada penelitian ini dilakukan observasi terhadap pengaruh *pre-roasting* laterit tipe limonit terhadap parameter kinetika *leaching* Fe. *Roasting* dilakukan pada 280 °C dan 610 °C untuk mengubah fase goetit menjadi hematit dan mendehidroksilasi mineral yang berasosiasi dengan Mg-Si. *Roasting* dilakukan selama 4 jam di dalam muffle furnace. Non-roasted dan roasted ore kemudian dileaching pada rentang suhu 30-90 °C pada variasi waktu 0 sampai 240 menit menggunakan asam sulfat dengan konsentrasi 2M, rasio S/L 10 g/100 mL, dan kecepatan putar 200 rpm. Roasted ore (280 °C) menunjukkan performa *leaching* yang lebih baik dibandingkan non-roasted ore sedangkan menaikkan suhu *roasting* menjadi 610 °C tidak memberikan kenaikan rekovery Fe yang signifikan. Parameter kinetika seperti energi aktivasi (E_A) dan faktor frekuensi juga berkurang dengan menggunakan roasted ore. Didapatkan E_A sebesar 31.66 kJ/mol pada proses *leaching* menggunakan roasted ore 280 °C. Proses *leaching* diketahui dikontrol oleh proses difusi melalui lapisan produk dengan persamaan kinetika sebagai berikut $kt = 31.59 \exp\left(-\frac{31.66}{RT}\right)t = 1 - \frac{2}{3}X - (1 - \frac{2}{3}X)^3$.

Kata kunci: Kinetika, Limonit, *Leaching*, *Pre-roasting*

Abstract

Valuable metal extraction from laterite has been increased. The scarcity of sulfide sources containing high Ni and the use of pyrometallurgical processes with high capital costs are important reasons to initiate extraction of valuable metals from oxide minerals such as laterite and hydrometallurgical methods such as *leaching*. This study examined the impact of limonite type laterite *pre-roasting* on the parameters of Fe *leaching* kinetics. *Roasting* was carried out at 280 °C and 610 °C to transform the goetite phase into hematite and dehydroxylate Mg-Si associated minerals. *Roasting* was carried out for 4 hours in a muffle furnace. Non-roasted and roasted ore were then leached at a temperature range of 30-90 °C at a time variation of 0 to 240 minutes using sulfuric acid at a concentration of 2M, S/L ratio of 10 g/100 mL, and rotating speed of 200 rpm. Roasted ore (280 °C) showed better *leaching* performance than non-roasted ore while increasing the *roasting* temperature to 610 °C did not provide a significant increase in Fe recovery. Roasted ore was also used to lower kinetic parameters consisting of activation energy (E_A) and frequency factor. An E_A value of 31.66 kJ/mol was obtained in the *leaching* process using 280 °C roasted ore. The *leaching* process is confirmed to be controlled by diffusion through the product layer with the following kinetic equation $kt = 31.59 \exp\left(-\frac{31.66}{RT}\right)t = 1 - \frac{2}{3}X - (1 - \frac{2}{3}X)^3$.

Keywords: Kinetics, Limonite, *Leaching*, *Pre-roasting*

1. Pendahuluan

Ekstraksi logam berharga seperti nikel (Ni), Kobalt (Co), dan Besi (Fe) pada sumber sekunder menjadi topik yang serius pada beberapa tahun terakhir. Keterbatasan dan kelangkaan deposit logam Ni dan Co pada sumber primer nya menjadi sebuah masalah serius terkait dengan pengembangan industri manufaktur (Pandey et al., 2022). Logam-logam berharga seperti Ni dan Co utamanya diolah dari mineral sulfida yang memiliki konsentrasi Ni dan

Co yang tinggi. Deposit sumber utama logam tersebut hanya 30% terdapat pada mineral sulfida sedangkan sisanya dari mineral oksida seperti laterit, namun pengolahan Ni dari *laterite* baru mencapai 25-30% dari total produksi nikel global (Astuti et al., 2015). Produksi Ni dari sumber bijih laterit biasanya dilakukan menggunakan *leaching*, hal ini dikarenakan kadar Ni yang rendah (<4%) dan Ni terkadang terdapat pada mineral refraktori (Aldino et al., 2020). Proses *leaching* dapat dilakukan

menggunakan teknologi *high pressure acid leaching* (HPAL) namun memerlukan *capital cost* dan biaya operasi yang tinggi dan masalah korosi. Metode lain adalah dengan menggunakan *leaching* atmosferik. *Leaching* atmosferik menggunakan energi yang lebih sedikit, kondisi operasi yang lebih *feasible* dan penanganan limbah yang mudah. *Leaching* atmosferik tidak bisa secara selektif mengekstraksi Ni dari *laterite*, beberapa logam seperti Fe, Mn dan Cr juga ikut terlindih dan terakumulasi pada *pregnant leach solution* (PLS) (Chang et al., 2016; Li et al., 2016; Muntaqin et al., 2022). Untuk meningkatkan rekoveri logam dari *laterite* biasanya dilakukan preparasi sampel terlebih dahulu sebelum proses *leaching*. Proses *pre-roasting* bijih dilakukan untuk membuka pori-pori bijih dan mengubah fase mineral mayor yang terdapat dalam laterit (geotit-FeOOH) menjadi hematit-Fe₂O₃. Dengan perubahan fase dan peningkatan surface area reaksi antara asam dan logam berharga (Ni, Co, Fe) dari laterit akan menjadi lebih mudah (memerlukan energi yang lebih kecil) (Garces-Granda et al., 2020; Li et al., 2013).

Penelitian terdahulu sudah banyak yang membahas tentang *leaching* atmosferik baik untuk laterit tipe limonit ataupun saprolit (*low Fe, high Mg, higher Ni*). Penelitian terhadap pengaruh efek *pre roasting* terhadap rekoveri logam Ni dan Co juga telah secara luas dibahas di berbagai publikasi. (MacCarthy et al., 2015) melakukan penelitian mengenai efek suhu, ukuran partikel dan mineralogi terhadap performa *leaching* Ni dari bijih laterit Australia. Didapatkan bahwa rekoveri Ni dan Co sangat bergantung pada suhu *leaching* dan mineralogi dari mineral yang terdapat pada laterit (*siliceous* geotit dan geotit). (Thubakgale et al., 2013) melaporkan tentang *Leaching* Ni dan Co dari mineral saprolite Afrika Selatan. Dalam penelitiannya dikatakan bahwa Ni dan Co dapat di ekstrak menggunakan *leaching* atmosferik pada ukuran partikel padat 75-106 mikron, 90 °C selama 480 menit, pada kondisi operasi tersebut didapatkan rekoveri Ni sebesar 98%. (Li et al., 2009) melaporkan bahwa *pre roasting* laterit akan mengakibatkan transformasi fase mineral dan peningkatan surface area sehingga "acid attack" akan menjadi lebih mudah. Diketahui bahwa geotit akan bertransformasi menjadi hematit pada suhu 277 °C yang mengakibatkan struktur mineral berubah atau rusak. Sedangkan *roasting* pada suhu 610 °C akan menyebabkan mineral yang berasosiasi dengan Mg-Si seperti lizardit (Mg₃Si₂(OH)₄O₅) akan terdekomposisi menyebabkan kenaikan surface area menjadi 26.45 m²/g. Kenaikan kadar Ni dalam PLS secara signifikan dari 33% ke 93.1% dengan membandingkan *raw ore* dan *roasted ore* 300 °C. Sedangkan terjadi penurunan kadar Fe dalam

PLS dari 78% ke 65%. *Roasting* pada suhu 610 °C fase mineral *amorph* Mg-Si terkristalisasi menjadi forsterit (Mg₂SiO₄) dan enstatit (MgSiO₃). Dengan kristalisasi mineral yang berasosiasi dengan Mg-Si tersebut akan mempermudah jalannya *leaching* mineral berharga. Dengan transformasi mineral *amorph* menjadi kristalin akan mereduksi proses readsorpsi logam yang telah terlindih. (Setiawan, 2016) melaporkan pada penelitiannya mengenai efek pemanasan dari laterit asal Pomalaa, Sulawesi Tenggara. Didapatkan bahwa reaksi endotermik terjadi pada suhu 78.8 °C, 293 °C dan 638 °C sedangkan reaksi eksotermik terjadi pada suhu 828 °C. Pada temperatur 293 °C terjadi penguapan air bebas dari geotit sehingga bertransformasi menjadi hematit, sedangkan pada 638 °C terjadi reaksi dehidroksilasi mineral serpentin dan pada 828 °C terjadi rekristalisasi fasa forsterit. Pada 638 °C struktur lizardit dan geotit mengalami kerusakan sehingga *surface area* akan terbuka untuk *acid attack*.

Dari penelitian terdahulu dapat diketahui bahwa adanya perbedaan signifikan terhadap rekoveri logam berharga seperti Ni, Co dan Fe dikarenakan efek *roasting* bijih laterit. Sudah banyak yang membahas mengenai efek *roasting* terhadap peningkatan rekoveri logam dan struktur mineral nya, namun belum banyak yang membahas tentang pengaruh *roasting* pada suhu tertentu terhadap parameter kinetika dari logam Fe sebagai logam mayor pada laterit tipe limonit. Dengan mengetahui perubahan parameter kinetika seperti energi aktivasi (E_A), faktor frekuensi, dan model kinetika yang mengontrol, maka akan mempermudah proses *scale up* industri. Berdasarkan gap yang ditemukan, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh *pre roasting* laterit tipe limonit terhadap aspek kinetika *leaching* Fe.

2. Metode

2.1 Karakter bijih

Laterit tipe limonit didapatkan dari area penambangan di daerah Morowali, Sulawesi Tengah. Karakterisasi bijih telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Prameswara et al., 2023). Didapatkan bahwa mineral pembawa Fe seperti geotit (16.8%), hematit (8.4%), dan magnetit (6.5%) terdapat pada sampel. Mineral yang berasosiasi dengan Mg-Si seperti lizardite (34.2%) dan clinocllore (21.2%) juga menjadi mineral mayor pada sampel.

2.2 Pre-roasting

Proses *pre-roasting* dilakukan pada suhu 280 °C dan 610 °C (Li et al., 2009). *Pre-roasting* dilakukan dengan memasukkan limonit sebanyak 300 g ke dalam cawan porselen dan dipanaskan

menggunakan muffle furnace (Nabertherm L9/12) selama 4 jam.

2.3 Proses leaching

Leaching dilakukan menggunakan alat dan bahan yang sama pada penelitian sebelumnya (Prameswara et al., 2022, 2023) di laboratorium Pengendalian Proses, Politeknik ATI Makassar. Labu leher tiga 500 mL dilengkapi dengan kondensor dan termometer dipakai sebagai reaktor *leaching*. Pemanasan dan pengadukan dilakukan menggunakan *hotplate*. Sebanyak 10 g sampel limonit dengan ukuran partikel <180 mikron dimasukkan ke dalam labu leher 3 berisikan 100 mL asam sulfat 2M pada rentang suhu 30-90 °C, durasi *leaching* bervariasi dari 60-240 menit, kecepatan putar ditahan konstan 200 rpm. Umpan dan residu *leaching* dianalisis menggunakan x-ray fluorescence (XRF) Panalytical Epsilon 1. Rekoveri *leaching* Fe dihitung berdasarkan persamaan (1) dan (2):

$$\text{Rekoveri Fe (\%)} = \frac{m_i.C_i - m_r.C_r}{m_i.C_i} \times 100 \quad (1)$$

$$X = \frac{\text{Rekoveri Fe}}{100} \quad (2)$$

2.4 Analisis kinetika

Leaching limonit merupakan reaksi padat-cair sehingga reaktan akan berdifusi melalui pori-pori dan permukaan padatan dan kemudian reaksi kimia terjadi. Penentuan model kinetika dilakukan dengan menggunakan *shrinking core model* (SCM) (Habashi, 1969; Sohn, 1979; Sohn & Wadsworth, 1979). Persamaan reaksi kimia dan difusi melalui lapisan produk mengontrol jalannya *leaching* ditunjukkan pada persamaan (3) dan (4):

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

$$1 - \frac{2}{3}X - (1 - X)^{\frac{2}{3}} = k_2 t \quad (4)$$

Dimana k_1 dan k_2 adalah konstanta laju reaksi untuk model reaksi kimia dan difusi melalui lapisan produk dan t adalah durasi *leaching* (menit).

Parameter kinetika lainnya seperti energi aktivasi (E_A) dan faktor frekuensi didapatkan melalui persamaan Arrhenius pada persamaan (5) dan (6):

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (5)$$

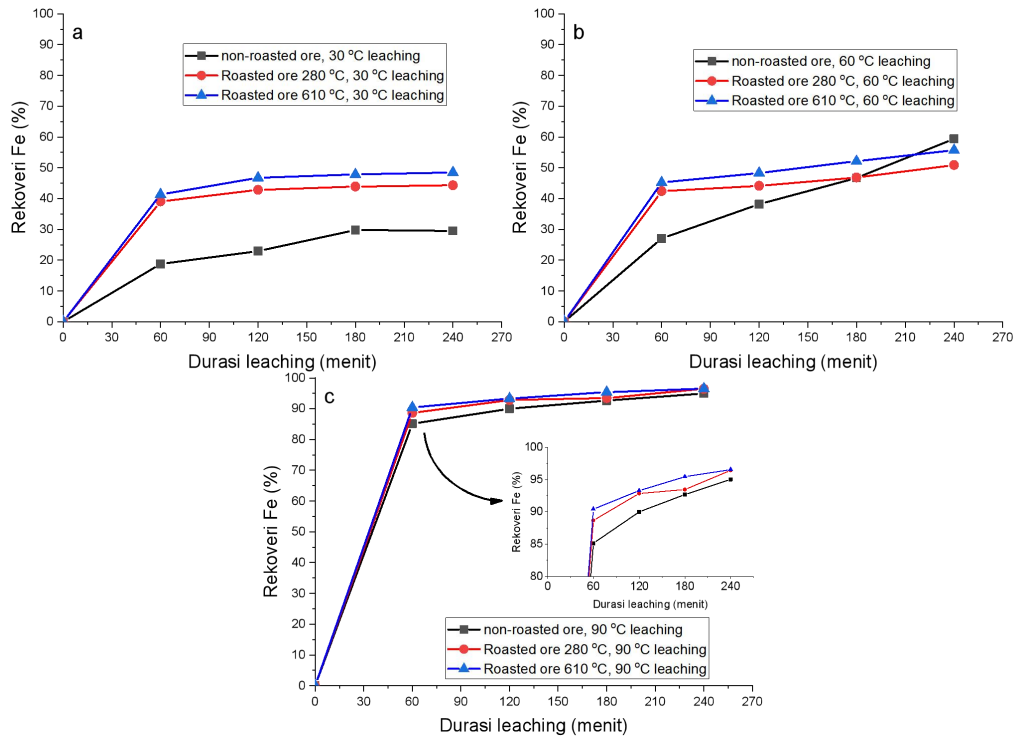
$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_A}{RT} \quad (6)$$

Dimana k_0 adalah faktor frekuensi, E_A adalah energi aktivasi (kJ/mol), R adalah tetapan (8.314 J/(mol.K)), dan T adalah suhu *leaching* (K).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh suhu *leaching* terhadap rekoveri Fe

Suhu merupakan faktor utama penentu performa *leaching* logam dari bijih, khususnya *leaching* Fe dan bijih limonit non-*roasted* dan *roasted*. Pada umumnya dengan kenaikan suhu, rekoveri *leaching* Fe akan semakin meningkat. Temperatur yang lebih tinggi memberikan lebih banyak energi panas ke sistem, yang meningkatkan frekuensi tumbukan dan energi antara partikel terlarut dan molekul pelarut. Frekuensi tumbukan yang meningkat ini menyebabkan laju reaksi yang lebih tinggi dan ekstraksi yang lebih cepat (MacCarthy et al., 2016; Prameswara et al., 2021; Trisnawati et al., 2022). Terlihat pada Gambar 1a, *leaching* Fe pada 30 °C untuk non-*roasted* ore terlihat naik secara konstan hingga 180 menit, sedangkan *roasted* ore tidak mengalami kenaikan rekoveri signifikan setelah 60 menit. Terlihat juga peningkatan rekoveri Fe dari 29.52% ke 44.16% dengan melakukan *roasting* pada limonit dengan suhu 280 °C. Kenaikan rekoveri tidak signifikan pada kenaikan suhu *roasting* menjadi 610 °C, hanya terdapat 48.69% Fe yang berhasil direkoveri pada durasi *leaching* 240 menit. Menariknya, pada Gambar 1b, non-*roasted* ore pada *leaching* 60 °C menunjukkan kenaikan rekoveri Fe secara konstan pada rentang durasi *leaching* 60-240 menit mencapai 59.41%. Rekoveri Fe pada *roasted* ore dengan suhu *leaching* 60 °C naik secara signifikan hingga 60 menit hingga 42.71% dan 45.51% untuk *roasted* ore 280 °C dan 610 °C kemudian rekoveri Fe secara perlahan mencapai kondisi kesetimbangan. Hal ini dapat terjadi dikarenakan perubahan morfologi mineral dari *roasted ore*. Pori-pori dan *surface area* yang lebih luas dari *roasted ore* memudahkan *acid attack* dan mempercepat proses *leaching* logam Fe. Rekoveri Fe dari masing-masing sampel non-*roasted* dan *roasted* dari proses *leaching* 90 °C disajikan pada Gambar 1c. Terlihat bahwa tren yang sama terbentuk untuk *leaching* non-*roasted* dan *roasted* limonit ore. Rekoveri Fe paling tinggi didapatkan dari *roasted* ore 610 °C, *leaching* 90 °C selama 240 menit, sebesar 96.14% Fe dapat direkoveri. Dari data Gambar 1, *roasted* ore memiliki pengaruh signifikan pada rekoveri Fe saat dileaching pada suhu rendah (30 dan 60 °C). Kenaikan rekoveri Fe tidak signifikan dengan menaikkan suhu *roasted* menjadi 610 °C. Dari pernyataan ini dapat diketahui bahwa proses *leaching* optimum Fe dari limonit didapatkan pada kondisi *roasted* ore 280 °C pada suhu dan durasi *leaching* 90 °C dan 60 menit.

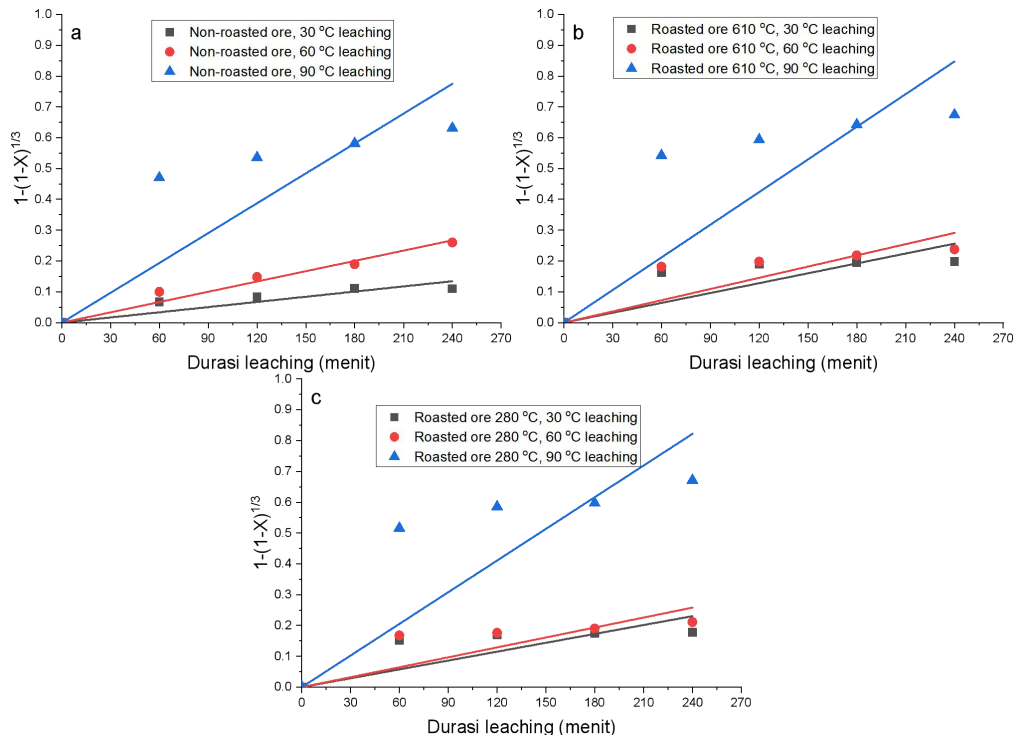


Gambar 1. Pengaruh suhu terhadap rekoveri Fe untuk bijih non-roasted, roasted 280 °C, roasted 610 °C dari proses *leaching* pada (a) 30, (b) 60, dan (c) 90 °C (konsentrasi H₂SO₄ 2M, rasio S//L=10 g/100 mL, 200 rpm)

3.2 Analisis kinetika

Reaksi *leaching* merupakan reaksi padat-cair dimana ada 2 langkah utama dalam proses *leaching* yaitu difusi melalui lapisan abu (produk) dan reaksi pada permukaan inti. Penentuan

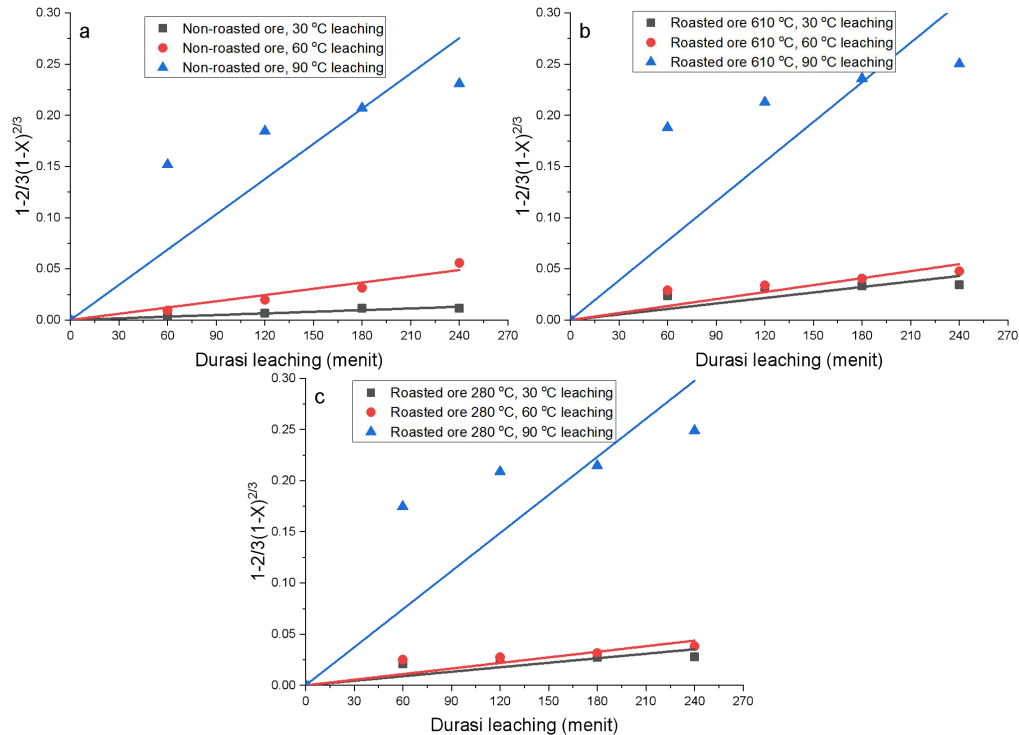
proses mengontrol ditentukan oleh proses yang paling lama. Dalam hal ini model kinetika dari persamaan (3) dan (4) diuji dengan data eksperimen untuk menentukan keakuratannya.



Gambar 2. Plot $1 - (1 - X)^{1/3}$ vs. durasi *leaching* untuk bijih (a) non-roasted, (b) roasted 280 °C, dan (c) roasted 610 °C

Gambar 2 menunjukkan plot persamaan (3) dengan durasi *leaching*. Terlihat bahwa pada *leaching non-roasted ore* dengan suhu *leaching* 30 dan 60 °C menunjukkan linearitas yang baik namun tidak dengan *leaching* 90 °C. Pada *leaching roasted ore*, Gambar 2b dan 2c, terlihat bahwa persamaan kinetika reaksi mengontrol tidak bisa menunjukkan akurasi yang baik.

Analisis kinetika untuk model difusi melalui lapisan produk mengontrol disajikan pada Gambar 3. Terlihat bahwa pada *leaching non-roasted* dan *roasted ore* dengan suhu *leaching* 30 dan 60 °C menunjukkan linearitas yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa model kinetika difusi melalui lapisan produk memang mengontrol jalannya *leaching*.



Gambar 3. Plot $1 - \frac{2}{3}X - (1 - X)^{\frac{2}{3}}$ vs. durasi *leaching* untuk bijih (a) non-roasted, (b) roasted 280 °C, dan (c) roasted 610 °C

Pernyataan ini juga dikonfirmasi dan didukung oleh koefisien determinasi (R^2) dari setiap plot pada Tabel 1. Nilai R^2 dari model kinetika difusi melalui lapisan produk lebih tinggi dibandingkan dengan R^2 dari model reaksi pada inti. (Astuti et al., 2015) juga menyebutkan bahwa *leaching* laterit menggunakan asam organik juga dikontrol oleh proses difusi. Hal ini juga sejalan dengan (Febriana et al., 2018) yang menyatakan bahwa *leaching* limonit dari Halmahera juga dikontrol oleh proses difusi melalui lapisan produk.

Model kinetika difusi melalui lapisan produk mengontrol kemudian dipakai untuk menentukan parameter kinetika seperti E_A , faktor frekuensi dan konstanta kecepatan reaksi. Tabel 2 menyajikan nilai konstanta kecepatan reaksi dari masing-masing sampel *leaching*. Nilai konstanta kecepatan reaksi ini kemudian dipakai untuk menentukan parameter E_A dan faktor frekuensi melalui persamaan Arrhenius.

Gambar 4. menyajikan plot Arrhenius untuk *leaching* masing-masing sampel. Terlihat bahwa plot *leaching non-roasted ore* memiliki slope (kemiringan) yang lebih tinggi dibandingkan dengan *roasted ore*. Hal ini mengindikasikan

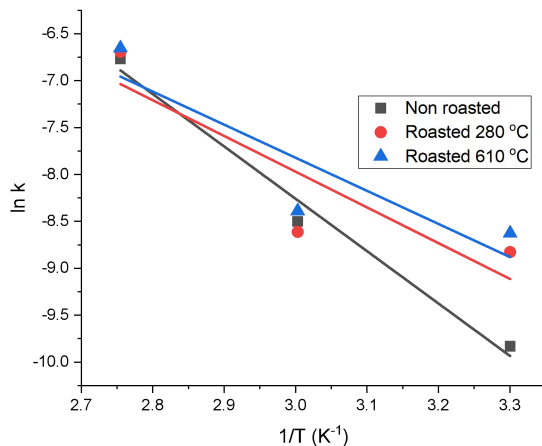
bahwa nilai $-E_A/R$ dari persamaan Arrhenius memiliki nilai yang lebih tinggi.

Tabel 1. Koefisien determinasi untuk model reaksi mengontrol dan difusi melalui partikel padat mengontrol

Suhu (°C)	R^2 (Reaction control)		
	Non roasted	Roasted 280 °C	Roasted 610 °C
30	0.94231	0.87043	0.87948
60	0.98901	0.89145	0.90119
90	0.90451	0.89415	0.88892
Suhu (°C)	R^2 (Diffusion control)		
	Non roasted	Roasted 280 °C	Roasted 610 °C
30	0.97788	0.89749	0.91022
60	0.97674	0.9315	0.94438
90	0.928	0.9116	0.90394

Tabel 2. Konstanta kecepatan reaksi untuk model difusi melalui lapisan partikel padat mengontrol k (Diffusion control)

Suhu (°C)	Non roasted	Roasted 280 °C	Roasted 610 °C
30	5.37E-05	1.47E-04	1.79E-04
60	2.03E-04	1.82E-04	2.27E-04
90	1.15E-03	1.24E-03	0.00129



Gambar 4. Plot Arrhenius untuk model difusi melalui lapisan partikel padat mengontrol

Pernyataan di atas dikonfirmasi melalui Tabel 3. Nilai EA dari proses *leaching roasted ore* 280 dan 610 °C lebih rendah dibandingkan dengan *non-roasted ore*. Terlihat penurunan nilai EA secara signifikan dari 46.39 kJ/mol ke 31.66 kJ/mol dengan *leaching roasted ore* 280 °C, namun penurunan EA tidak berpengaruh banyak ketika suhu *roasting* dinaikkan menjadi 610 °C. Hal ini membuktikan bahwa dengan menaikkan *roasting* pada 280 °C dapat mengurangi energi yang dibutuhkan untuk proses *leaching* limonit. Dengan demikian didapatkan persamaan kinetika untuk proses *leaching roasted* (280 °C) limonit ore yaitu $kt = 31.59 \exp\left(-\frac{31.66}{RT}\right)t = 1 - \frac{2}{3}X - (1 - X)^{\frac{2}{3}}$.

Tabel 3. Parameter kinetika *leaching*

Parameter	Non roasted	Roasted 280 °C	Roasted 610 °C
EA (kJ/mol)	46.39	31.66	29.32
k ₀ (min ⁻¹)	4825.00	31.59	15.76
R ²	0.98387	0.78331	0.79888

4. Kesimpulan

Telah dilakukan observasi pengaruh *pre-roasting* terhadap kinetika *leaching* Fe dari bijih laterit tipe limonit. *Roasted ore* 280 °C menaikkan rekoveri *leaching* Fe secara signifikan sedangkan dengan menaikkan suhu *roasting* tidak memberikan pengaruh *leaching* yang berarti.

Didapatkan kondisi optimum adalah dengan menggunakan *roasted ore* 280 °C untuk *leaching* limonit ore pada 90 °C selama 60 menit menggunakan asam sulfat 2M, rasio S/L 10 g/100 mL, dan kecepatan pengadukan 200 rpm. Semakin tinggi suhu *roasting* maka semakin rendah nilai EA dan faktor frekuensi yang diperlukan untuk proses *leaching* Fe. Menaikkan suhu *roasting* dari 280 °C ke 610 °C tidak menurunkan nilai EA secara signifikan. Nilai EA pada *leaching* sampel *roasted* 280 °C sebesar 31.66 kJ/mol mengikuti model kinetika difusi melalui lapisan produk mengontrol. Sehingga didapatkan persamaan kinetika *leaching* Fe dari laterit tipe limonit menggunakan sampel *roasted* 280 °C yaitu $kt = 31.59 \exp\left(-\frac{31.66}{RT}\right)t = 1 - \frac{2}{3}X - (1 - X)^{\frac{2}{3}}$.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih diberikan kepada Politeknik ATI Makassar atas dukungan pendanaan yang diberikan

Daftar Pustaka

- Aldino, T., Guskarnali, G., & Irvani, I. (2020). Pendugaan Potensial Penyebaran Mineralisasi Sumberdaya Timah Primer Menggunakan Metode Geomagnetik Pada Wilayah IUP PT TIMAH (Persero) Tbk Di Desa Pengarem Kecamatan Tukak Sadai Kabupaten Bangka Selatan. *MINERAL*, 2(2), 116–119.
<https://doi.org/10.33019/mineral.v2i2.1567>
- Astuti, W., Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. (2015). Kinetics of nickel extraction from Indonesian saprolitic ore by citric acid leaching under atmospheric pressure. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 32(3), 176–185.
<https://doi.org/10.1007/BF03402286>
- Chang, Y., Zhao, K., & Pešić, B. (2016). Selective leaching of nickel from pre-reduced limonitic laterite under moderate HPAL conditions- Part I: Dissolution. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 52(2), 127–134.
<https://doi.org/10.2298/JMMB151102023C>
- Febriana, E., Manaf, A., Prasetyo, A. B., & Mayangsari, W. (2018). Thermal characteristic of limonite ore upon calcination and reduction. *AIP Conference Proceedings*, 1964(May), 020026.
<https://doi.org/10.1063/1.5038308>
- Garces-Granda, A., Lapidus, G. T., & Restrepo-Baena, O. J. (2020). Effect of a thermal pretreatment on dissolution kinetics of a limonitic laterite ore in chloride media. *Hydrometallurgy*, 196(July), 105428.

- <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105428>
- Habashi, F. (1969). *Principle of Extractive Metallurgy: General Principle* (1st ed., Vol. 1). Gordon and Breach.
- Li, J., Bunney, K., Watling, H. R., & Robinson, D. J. (2013). Thermal pre-treatment of refractory limonite ores to enhance the extraction of nickel and cobalt under heap leaching conditions. *Minerals Engineering*, 41, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.002>
- Li, J., Li, X., Hu, Q., Wang, Z., Zhou, Y., Zheng, J., Liu, W., & Li, L. (2009). Effect of pre-roasting on leaching of laterite. *Hydrometallurgy*, 99(1–2), 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.07.006>
- Li, J., Li, Y., Gao, Y., Zhang, Y., & Chen, Z. (2016). Chlorination roasting of laterite using salt chloride. *International Journal of Mineral Processing*, 148, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.007>
- MacCarthy, J., Nosrati, A., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2015). Acid leaching and rheological behaviour of a siliceous goethitic nickel laterite ore: Influence of particle size and temperature. *Minerals Engineering*, 77, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.031>
- MacCarthy, J., Nosrati, A., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2016). Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*, 160, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.004>
- Muntaqin, A., Rahmasari, L., Lintang Edi Wahyuni, N., & Pasonang Sihombing, R. (2022). The effect of sulfuric acid concentration on nickel recovery from laterite ore by using atmospheric acid leaching method. *Jurnal Kimia Riset*, 7(1).
- Pandey, N., Tripathy, S. K., Patra, S. K., & Jha, G. (2022). Recent Progress in Hydrometallurgical Processing of Nickel Lateritic Ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(1), 11–30. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02706-2>
- Prameswara, G., Trisnawati, I., Mulyono, P., Prasetya, A., & Petrus, H. T. B. M. (2021). Leaching Behaviour and Kinetic of Light and Heavy Rare Earth Elements (REE) from Zircon Tailings in Indonesia. *JOM*, 73(4), 988–998. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04584-3>
- Prameswara, G., Tyassena, F. Y. P., Pasaribu, M., & Febryanzha, I. N. (2022). Kinetika Leaching Ni dan Fe dari Bijih Laterit Tipe Limonite Morowali. *REACTOR: Journal of Research on Chemistry and Engineering*, 3(2), 57–62.
- Prameswara, G., Tyassena, F. Y. P., Pasaribu, M., Trisnawati, I., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Nickel Recovery Optimization and Kinetic Study of Morowali Laterite Ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(5), 1341–1348. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02858-1>
- Setiawan, I. (2016). Karakteristik Nikel Laterit Indonesia pada Pemanasan dari 600 C sampai dengan 1000 C. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2016, November*, 58–66.
- Sohn, H. Y. (1979). Fundamentals of the Kinetics of Heterogeneous Reaction Systems in Extractive Metallurgy. In *Rate Processes of Extractive Metallurgy* (pp. 1–51). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9117-3_1
- Sohn, H. Y., & Wadsworth, M. E. (1979). *Rate Processes of Extractive Metallurgy* (H. Y. Sohn & M. E. Wadsworth (eds.); Vol. 148). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9117-3>
- Thubakgale, C. K., Mbaya, R. K. K., & Kabongo, K. (2013). A study of atmospheric acid leaching of a south african nickel laterite. *Minerals Engineering*, 54, 79–81. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.006>
- Trisnawati, I., Prameswara, G., Sari, E. P., Prasetya, A., Mulyono, P., & Petrus, H. T. M. B. (2022). Roasting Decomposition for Phosphate Separation from Zircon Tailing. *Journal of Mining Science*, 58(5), 830–838. <https://doi.org/10.1134/S1062739122050143>