

Available online at: <http://reactor.poltekattidg.ac.id/>**REACTOR****Journal of Research on Chemistry and Engineering**

| ISSN Online 2746-0401 |



Efek *Pre-Roasting* Terhadap Parameter Kinetika *Leaching* Cr dari Limonit

Gyan Prameswara ^{1*}, Andi Nurfaadilah Ulfah ¹, Cipta Panghegar Supriadi ², Iga Trisnawati ³, Himawan Tri Bayu Murti Petrus ⁴

¹ Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar, Makassar, 90211, Indonesia

² Program Studi Teknik Metalurgi, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Bandung, 40211, Indonesia

³ Program Studi Teknokimia Nuklir, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55281, Indonesia

⁴ Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: July 04, 2023

Revised: November 30, 2023

Available online: December 04, 2023

KEYWORDS

Chromium, Leaching, Limonite, Pre-Roasted

CORRESPONDENCE

Name: Gyan Prameswara

E-mail: gyan@atim.ac.id

ABSTRACT

Hydrometallurgical processes such as leaching of limonite ore to extract valuable metals including Ni and Co are often non-selective, including other metals in the leachate product. The leaching behavior of Cr from the chromite mineral contained in limonite ore is of concern due to the high Cr content of the leachate effluent. The pre-roasted process is frequently used to pre-treat limonite to increase the precious metal content. This study aims to determine the leaching behavior of Cr and the effect of pre-roasting on its kinetic parameters. The pre-roasting process was carried out at 280 and 610 °C for 4 hours. Observation of Cr leaching behavior was carried out in the leaching temperature range of 30-90 °C for 0-120 minutes using sulfuric acid solvent. The highest Cr recovery was achieved in pre-roasted ore leaching at 610 °C with leaching operating conditions of 2 M sulfuric acid, solid-liquid ratio of 5 g/50 mL, 200 rpm, for 120 minutes, at a leaching temperature of 90 °C, under these conditions Cr recovery reached 53.16%. The higher the roasting temperature, the lower the activation energy required for the leaching process. Cr leaching from raw and pre-roasted ore is controlled by the diffusion process through the ash layer with activation energies (E_A) of 21.41, 18.64, and 14.71 kJ/mol for raw ore, pre-roasted ore 280 °C, and pre-roasted ore 610 °C, respectively. The comparison of kinetics data from several roasting products for atmospheric leaching feeds will provide industry with information to integrated pyro-hydrometallurgical process to increase Cr production from laterite.

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi tidak diragukan lagi telah memberikan dampak yang signifikan terhadap konsumsi mineral dan logam, termasuk logam yang berasal dari bijih laterit [1]. Bijih laterit merupakan jenis bijih yang kaya akan kandungan besi, aluminium, dan nikel yang banyak ditemukan di daerah tropis [2], [3]. Laterit menjadi topik utama dikarenakan keberadaan nikel (Ni) dan kobalt (Co) yang banyak dipakai pada industri maju seperti aplikasinya pada baterai kendaraan listrik [4], [5]. Produksi Ni dan Co utamanya dilakukan menggunakan bijih sulfida yang memiliki kadar Ni tinggi, namun

kelangkaan akibat eksploitasi terus menerus menjadi permasalahan [6]. Kegiatan ekstraksi Ni dan Co beralih ke bijih oksida yang memiliki kadar logam Ni lebih rendah. Proses pengolahan bijih kompleks seperti laterit tipe limonit atau saprolit biasanya dilakukan menggunakan proses hidrometalurgi dengan *leaching* sebagai jantung proses [7], [8]. Namun ada salah satu permasalahan pada proses *leaching*, tidak selektif. Logam-logam dari mineral oksida seperti krom (Cr) dari *chromite*, besi (Fe) dari hematit, geotit dan magnetit, serta mangan dari mangan oksida ikut terlindih pada proses *leaching*. Untuk mengatasi masalah ini, perlu dilakukan pengukuran kinetika reaksi untuk mengetahui perilaku *leaching* masing-masing logam, sehingga bisa

dilakukan pemurnian lanjut seperti proses presipitasi bertingkat untuk memurnikan masing-masing logam.

Kromium pada umumnya bukan merupakan komponen yang signifikan dari bijih laterit. Keterdapat dan perilaku kromium bervariasi berdasarkan kondisi oksidanya. Bentuk-bentuk tertentu dari kromium, seperti kromium heksavalen (Cr (VI)), dapat lebih mudah larut dan dapat tercuci bersama dengan logam lainnya. Namun, pelindian kromium dapat dikontrol dan diminimalkan dengan menyesuaikan kondisi pelindian, seperti pH dan suhu. Selain itu, berbagai metode pengolahan, seperti reduksi atau pengendapan, dapat digunakan untuk merecoveri Cr dari larutan pelindian. Keberadaan Cr pada laterit, khususnya tipe limonit, berikatan dengan Fe pada mineral *chromite* (FeCr_2O_4). Aryanhi dan Jayanti melaporkan bahwa terdapat sebanyak 1.86 % Cr pada bijih tipe limonit di Morowali, Indonesia [9]. Delina dkk. juga menyatakan bahwa semakin dalam lapisan laterit (dari limonit ke saprolit) maka semakin kecil kadar logam Cr. Keberadaan Cr pada laterit berkisar pada 1.5 % sampai 4.2 % [10]. MacCarthy dkk. melakukan observasi terhadap perilaku *leaching* dari logam-logam pada saprolit. Konsentrasi logam Cr meningkat signifikan pada larutan leachate pada kenaikan suhu dari 70 °C ke 95 °C [11]. Pada penelitian Godgul dkk. dilaporkan bahwa tidak ada kaitan antara kadar total Cr pada sampel *chromite*-laterit dengan *leachate*. Hal ini dikarenakan Cr terdistribusi tidak hanya pada satu fase mineral saja (*chromite*) [12].

Masih terdapat gap pengetahuan terhadap perilaku *leaching* Cr dari laterit khususnya tipe limonit. Masih belum banyak bahkan tidak ada yang membahas tentang perilaku kinetika *leaching* Cr. Dengan mengetahui pengaruh kondisi operasi *leaching* dan kinetika *leaching* dari logam Cr dapat mengisi gap tersebut. Pada penelitian ini dilakukan observasi terhadap pengaruh suhu terhadap *leaching* Cr, efek *pre-roasting* diobservasi terhadap perubahan parameter kinetika *leaching* Cr seperti nilai energi aktivasi (E_A), faktor frekuensi (k_0) serta model kinetika yang mengontrol jalannya *leaching*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perbedaan parameter kinetika yang diakibatkan perbedaan suhu *roasting* umpan *leaching* atmosferik. Studi ini dapat memberikan informasi bagi industri untuk mengintegrasikan proses piro-hidrometalurgi untuk meningkatkan proses *leaching* Cr dari laterit.

METODOLOGI

Karakterisasi Mineral

Bijih laterit tipe limonit didapatkan dari Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, Indonesia. Terdapat beberapa logam berharga pada sampel limonit ini seperti Ni (1.9 %), Fe_2O_3 (39.5 %), Co (0.16 %), MgO (8.55 %),

sedangkan Cr sebanyak 2.5 % termasuk pada *trace element*. Sampel ini merupakan sampel yang sama dengan sampel yang dipakai pada penelitian sebelumnya [13]–[15]. Mineral pada bijih dikarakterisasi menggunakan *x-ray diffraction* (XRD) SmartLab dengan rentang 2 θ 5-90°. Pola difraksi sinar x dari sampel disajikan pada Gambar 1.

Pre-Roasting

Proses *pre-roasting* dilakukan menggunakan *muffle furnace* (Nabertherm L9/12/C6) pada 210 °C dan 610 °C. Sebanyak masing-masing 100 g limonit dimasukkan ke porselen 100 mL kemudian dilakukan proses *pre-roasting* di dalam *muffle furnace* selama 4 jam [16]. Proses *pre-roasting* 4 jam mengakibatkan proses dehidroksilasi laterite dan pemecahan ikatan mineral menjadi oksida-oksida sederhana masing-masing. Waktu pemanggangan yang terlalu singkat dapat menyebabkan konversi mineral yang tidak sempurna, yang mengarah pada efisiensi *leaching* yang tidak optimal.

Proses Leaching

Leaching dilakukan di dalam labu leher tiga 500 mL dilengkapi dengan *termometer* dan *refluks condenser*. Pemanasan dilakukan menggunakan *hotplate* serta *magnetic stirrer* untuk proses pengadukan. Sebanyak 50 mL H_2SO_4 2 M dipanaskan hingga mencapai suhu target (30, 60, dan 90 °C) sembari diaduk. Kemudian sebanyak 5 g sampel (*raw laterit* dan *pre-roasted ore*) dicampurkan pada pelarut di dalam labu leher tiga. Kondisi operasi seperti konsentrasi asam sulfat, rasio padat-cair (5 g/50 mL asam sulfat), dan kecepatan putar (200 rpm) dikontrol agar selalu konstan. Kadar Cr pada sampel umpan dan residu *leaching* dianalisis menggunakan *x-ray fluorescence* (XRF) Panalytical Epsilon 1. Rekoveri dan fraksi *leaching* Cr dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2) berikut:

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

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

Dimana m_i dan m_r adalah massa sampel umpan dan residu (g), C_i dan C_r adalah konsentrasi Cr pada sampel umpan dan residu (%), sedangkan X merupakan fraksi Cr.

Analisis Kinetika

Model kinetika *leaching shrinking core model* (SCM) yang diajukan oleh Levenspiel dipakai pada penelitian ini untuk menguji data eksperimen [17]. Proses *leaching* pada umumnya terbagi menjadi 3 proses penting yaitu proses (1) difusi pelarut melalui lapisan film, (2) difusi pelarut melalui lapisan abu, dan (3) reaksi pada permukaan inti [3]. Model reaksi mengontrol, difusi melalui lapisan film, dan melalui lapisan abu mengontrol

dipakai untuk mengetahui karakter *leaching*. Model kinetika tersebut tersaji pada persamaan (3)-(5):
Difusi melalui lapisan film

$$kt = X \quad (3)$$

Difusi melalui lapisan abu

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

Reaksi pada inti

$$kt = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Dimana k merupakan konstanta kecepatan reaksi (menit⁻¹), t adalah durasi *leaching* (menit), dan X adalah fraksi *leaching* Cr. Parameter kinetika seperti E_A dan k_0 dihitung melalui persamaan Arrhenius pada persamaan (6) dan (7) berikut:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (6)$$

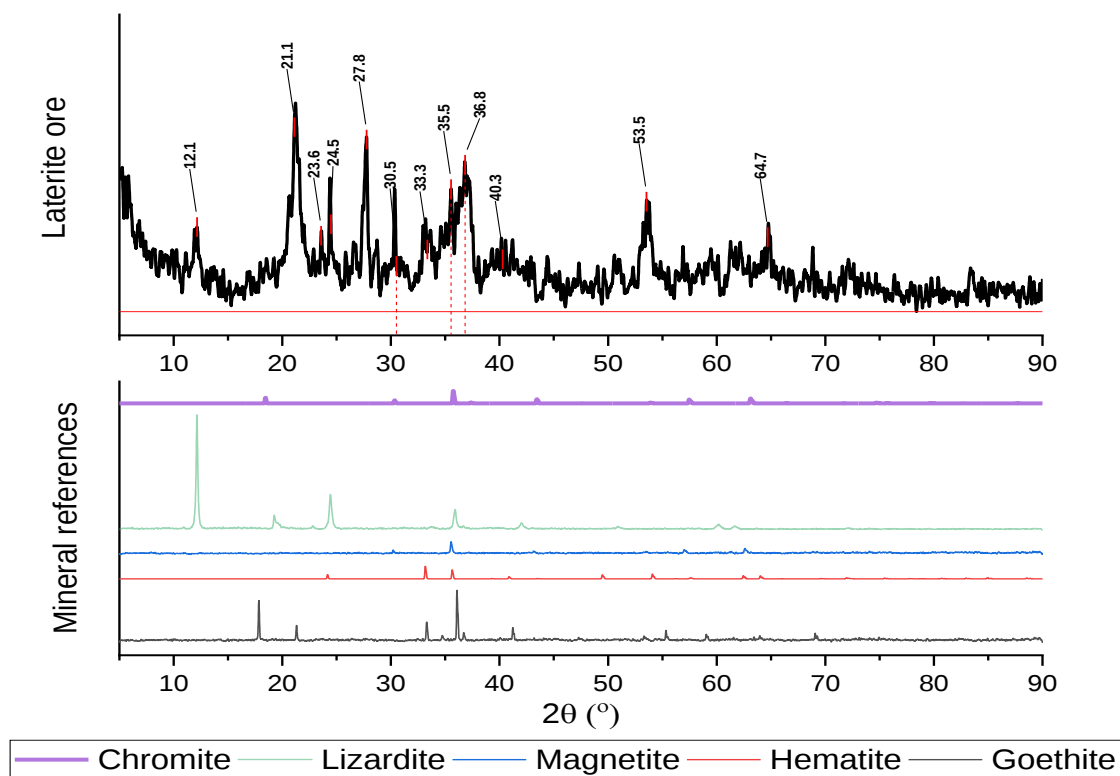
$$\ln(k) = \ln(k_0) - \frac{E_A}{RT} \quad (7)$$

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

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakter Mineral

Karakterisasi mineral dari bijih limonit disajikan pada Gambar 1. Terlihat bahwa fase mineral pembawa Cr pada bijih adalah mineral *chromite* (FeCr_2O_4). Terlihat intensitas mayor *chromite* pada 2θ (30.5° , 35.5° dan 36.8°) serta terdapat intensitas minor pada 18.45° , 43.45° , 57.48° , dan 63.14° . *Chromite* sudah terkonfirmasi diwakilkan oleh 3 intensitas mayor pada *laterite ore*, walaupun 4 intensitas minor tidak menunjukkan *peak* yang signifikan. Tidak hanya *chromite*, mineral lain seperti mineral pembawa Fe (geotit (FeOOH), hematite (Fe_2O_3), dan magnetit (Fe_3O_4)) juga terdeteksi pada sampel. Fase mineral mayor lainnya, mineral impuritas, seperti lizardite ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) yang merupakan sumber Mg dan Si pada bijih limonit terdapat pada sampel. Hal ini menunjukkan kompleksitas mineral-mineral yang terdapat pada bijih limonit. Komposisi Ni dan Mg rendah serta Fe tinggi mengkonfirmasi tipe bijih limonit [18], [19]. Keterdapatannya *chromite* dikarenakan dari penghilangan Mg dan Si dari batuan *ultramafic*, yang menyebabkan kadar *chromite* lebih tinggi akibat proses *weathering* bijih laterit [20].



Gambar 1. Difraksi sinar X dari laterit ore

Efek Pre-Roasting Terhadap Komposisi Cr

Proses *pre-roasting* terhadap laterit dengan tipe limonit mengakibatkan beberapa mineral terdekomposisi menjadi fase mineral lain. Sebagai contoh, geotit akan

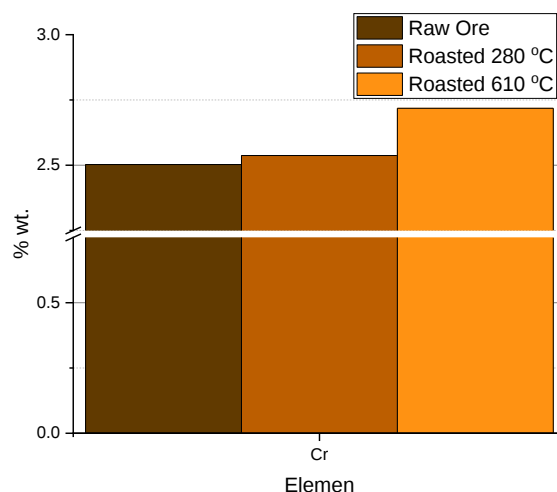
bertransformasi menjadi hematit pada 277°C dan lizardite akan terdekomposisi pada 610°C [16], [21], [22]. Dari dua peristiwa tersebut akan terjadi pembukaan pori mineral mayor yang mengakibatkan ekspos yang lebih tinggi terhadap mineral *chromite*. Hal ini

dibuktikan pada komposisi Cr pada bijih *pre-roasted* meningkat menjadi 2.54 % dan 2.71 % pada *pre-roasted* 280 °C dan 610 °C, berurutan. Proses *pre-roasting* 280 °C juga akan mengakibatkan dehidroksilasi dari mineral *chromite*. Molekul air yang terikat dengan mineral akan terlepas dan terjadi oksidasi Fe(II) menjadi Fe(III) dari mineral *chromite*. Pada *pre-roasting* 610 °C transformasi mineral *chromite* akan berlanjut. Pada suhu tersebut Fe pada *chromite* akan terdekomposisi menjadi hematit (Fe_2O_3) dan Fe metal sedangkan Cr akan terdekomposisi menjadi Cr_2O_3 [23], [24]. Kenaikan signifikan terjadi pada *pre-roasting* 610 °C, hal ini dikarenakan Cr dan Fe terpisah menjadi oksidanya masing-masing dari mineral *chromite* [25]. Hal ini dibuktikan pada komposisi Cr yang disajikan pada Gambar 2.

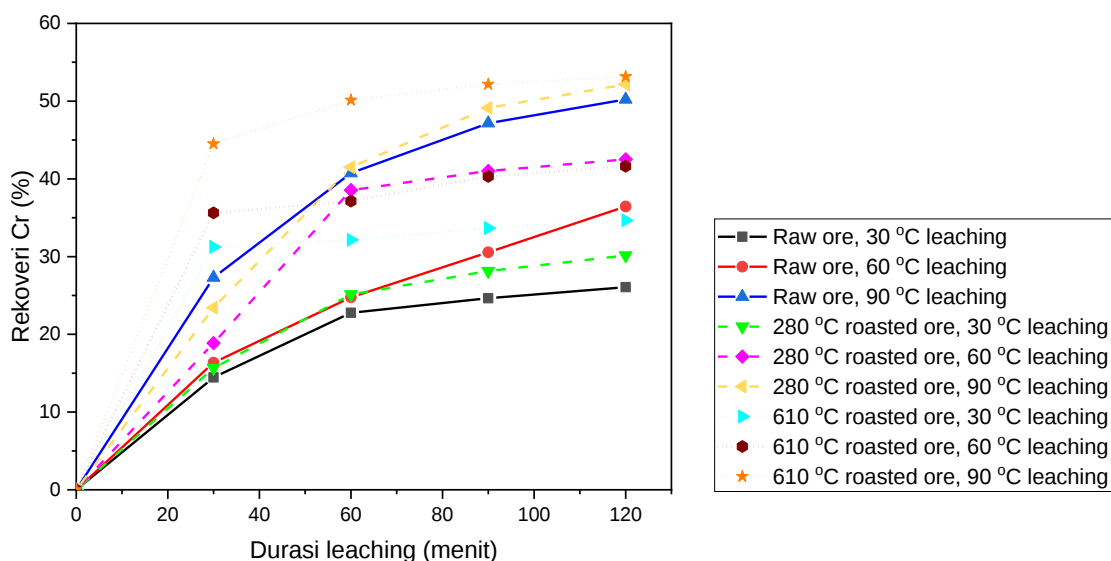
Leaching Roasted Ore

Rekoveri Cr dari proses *leaching raw ore* dan *pre-roasted* pada 280 °C dan 610 °C disajikan pada Gambar 3. Terlihat bahwa kenaikan suhu *leaching* pada *raw ore*

dari 60 ke 90 °C mengakibatkan rekoveri Cr naik secara signifikan, namun tidak terlihat perbedaan rekoveri Cr yang berarti pada *leaching* suhu 30 dan 60 °C. Dengan *pre-roasted* 280 °C, rekoveri Cr meningkat pada semua suhu *leaching* dibandingkan dengan *leaching raw ore*. Kondisi setimbang juga lebih cepat dicapai untuk suhu *leaching* 60 °C, rekoveri *leaching* Cr mencapai kesetimbangan pada 60 menit sebesar 38.54 %. Rekoveri Cr tertinggi untuk *pre-roasted ore* 280 °C didapatkan pada temperatur 90 °C selama 120 menit, rekoveri Cr mencapai 52.15 %. Rekoveri *pre-roasted ore* 610 °C menunjukkan perilaku yang unik. Terlihat bahwa pada semua suhu *leaching* rekoveri Cr mencapai setimbang pada 30 menit awal. Rekoveri Cr tertinggi untuk *pre-roasted ore* 610 °C didapatkan pada temperature *leaching* 90 °C selama 120 menit, rekoveri Cr mencapai 53.16 %. Hal ini membuktikan bahwa dengan proses *pre-roasting leaching* Cr akan menjadi lebih mudah dan tidak diperlukan durasi *leaching* yang lama.



Gambar 2. Pengaruh *Pre-roasting* Terhadap Konsentrasi Cr



Gambar 3. Pengaruh Suhu *Roasting* Terhadap Rekoveri *Leaching* Cr

Analisis Kinetika Leaching Cr

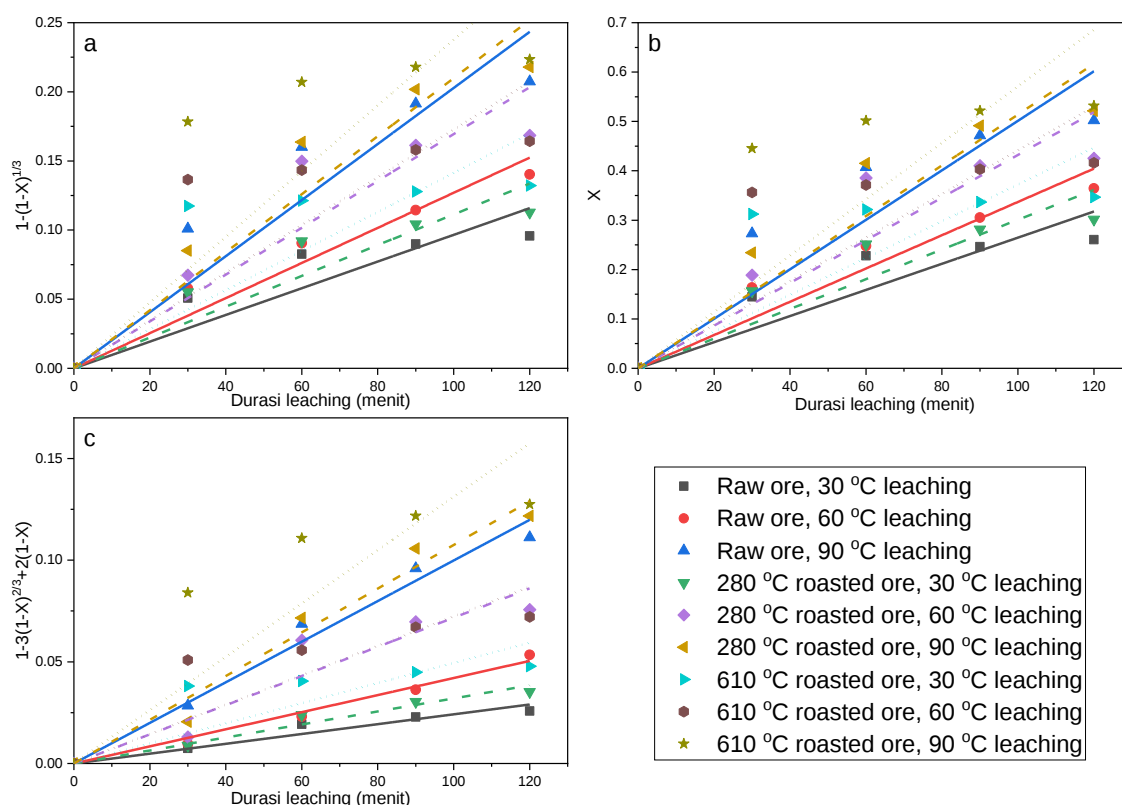
Analisis kinetika dilakukan dengan plotting tiga model SCM yang dipakai (difusi melalui lapisan film, difusi melalui lapisan abu, dan reaksi pada inti) vs. durasi *leaching*. Gambar 4 menunjukkan linearitas dari masing-masing model kinetika dan sampel *leaching*. Terlihat bahwa model kinetika reaksi pada inti (Gambar 4a) gagal menunjukkan linearitas yang baik. Proses *leaching* Cr terlihat menunjukkan linearitas yang baik pada model difusi melalui lapisan abu (Gambar 4c). Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu bahwa *leaching* Cr dari residu *chromite ore* menggunakan asam (HF) dikontrol oleh proses difusi melalui lapisan produk dengan E_A sebesar 8.69 kJ/mol [26].

Tabel 1 menyajikan konstanta kecepatan reaksi (k) untuk setiap model dan jenis sampel. Untuk mengkonfirmasi model SCM *fitting* dengan data eksperimen, dilakukan pengecekan terhadap nilai koefisien determinasi (R^2) pada Tabel 2. Terlihat bahwa nilai R^2 dari model difusi mengontrol (melalui lapisan film dan/atau lapisan abu) lebih baik (mendekati 1) daripada model reaksi pada inti mengontrol. Oleh karena itu, perhitungan parameter

kinetika (E_A dan k_0) menggunakan persamaan Arrhenius dilakukan hanya untuk model difusi melalui lapisan abu mengontrol.

Tabel 1. Konstanta Kecepatan Reaksi Masing-Masing Model Kinetika

Suhu <i>leaching</i> (°C)	Reaksi mengontrol	Difusi melalui lapisan film mengontrol	Difusi melalui lapisan abu mengontrol
k (Raw ore)			
30	9.65E-04	2.65E-03	2.42E-04
60	1.27E-03	3.37E-03	4.20E-04
90	2.03E-03	5.01E-03	9.99E-04
k (Roasted 280 °C)			
30	1.11E-03	3.01E-03	3.21E-04
60	1.69E-03	4.32E-03	7.18E-04
90	2.10E-03	5.14E-03	1.08E-03
k (Roasted 610 °C)			
30	1.41E-03	3.72E-03	4.95E-04
60	1.73E-03	4.41E-03	7.24E-04
90	2.38E-03	5.71E-03	1.31E-03



Gambar 4. Plot Durasi *Leaching* vs. Model Kinetika (a) Reaksi Mengontrol, (b) Difusi Melalui Lapisan Film Mengontrol, dan (c) Difusi Melalui Lapisan Abu Mengontrol

Pada Gambar 5 tersaji plot *Arrhenius* untuk model kinetika difusi melalui lapisan abu mengontrol untuk 3 jenis sampel umpan. Terlihat bahwa ketiga plot tersebut menunjukkan linearitas yang baik. Tabel 3 menyajikan

data parameter kinetika yang didapatkan. Dengan memakai sampel umpan *pre-roasted* (280 dan/atau 610 °C) nilai E_A dari proses *leaching* dapat diturunkan, artinya *leaching* menjadi lebih mudah ketika memakai

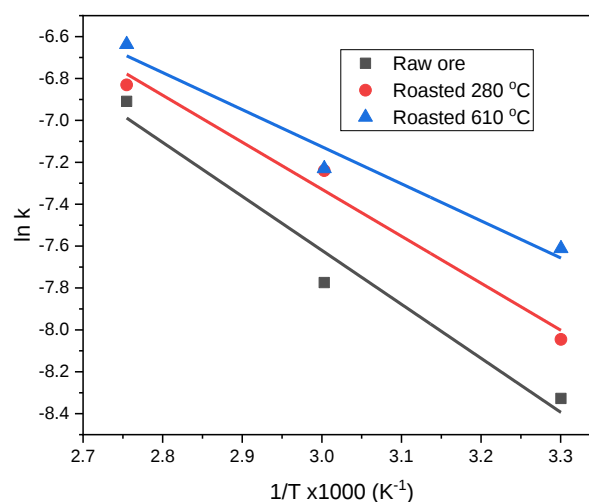
sampel *pre-roasted*. Terlihat bahwa nilai E_A berkurang dari 21.41 ke 18.64 dan 14.71 kJ/mol untuk sampel umpan *pre-roasted* 280 dan 610 °C, berurutan. Hal ini sedikit berbeda dari penelitian terdahulu pada *leaching* menggunakan limbah residu pengolahan mineral *chromite* menggunakan HF (44.15 kJ/mol) [27] dan *leaching* Cr dari *spent catalyst* menggunakan asam asetat (43.31 kJ/mol) [28]. Hal ini disebabkan proses *leaching* yang dikontrol oleh proses difusi memiliki karakter $E_A < 40$ kJ/mol [29]. Oleh karena itu, model kinetika *leaching* Cr dari *raw laterit ore* dapat diekspresikan sebagai $kt = 1.11 \exp \frac{-21.41}{RT} t = 1 - 3(1 - X)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X)$, sedangkan *leaching roasted ore* 280 °C sebagai $kt = 0.55 \exp \frac{-18.64}{RT} t = 1 - 3(1 - X)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X)$, dan *leaching roasted ore* 610 °C sebagai $kt = 0.16 \exp \frac{-14.71}{RT} t = 1 - 3(1 - X)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X)$. Model kinetika yang didapatkan dapat menjadi acuan untuk peningkatan skala pengolahan Cr melalui proses *pre-roasting* di industri pengolahan mineral.

Tabel 2. Koefisien Determinasi Masing-Masing Model Kinetika

Suhu <i>leaching</i> (°C)	Reaksi mengontrol	Difusi melalui lapisan film mengontrol	Difusi melalui lapisan abu mengontrol
R² (Raw ore)			
30	0.9440	0.9389	0.9784
60	0.9833	0.9759	0.9948
90	0.9615	0.9486	0.9930
R² (Roasted 280 °C)			
30	0.9555	0.9493	0.9877
60	0.9523	0.9464	0.9641
90	0.9735	0.9626	0.9898
R² (Roasted 610 °C)			
30	0.9615	0.9486	0.9930
60	0.9735	0.9626	0.9898
90	0.8871	0.8767	0.9219

Tabel 3. Parameter Kinetika

	Difusi Melalui Lapisan Abu		
	Raw ore	Roasted 280 °C	Roasted 610 °C
Slope ($-E_A/R$)	-2.5756	-2.2427	-1.7690
Intercept ($\ln k_0$)	0.1065	-0.6005	-1.8186
R ²	0.9656	0.9820	0.9691
E_A (kJ/mol)	21.41	18.64	14.71
k_0 (min ⁻¹)	1.11	0.55	0.16



Gambar 5. Plot Arrhenius

KESIMPULAN

Pengaruh *pre-roasting* terhadap parameter kinetika *leaching* Cr dari bijih limonit telah dilakukan. Didapatkan bahwa proses *pre-roasting* bijih limonit meningkatkan kadar Cr pada sampel umpan, peningkatan suhu *roasting* menyebabkan kenaikan kadar Cr pada limonit. Kadar Cr paling tinggi didapatkan untuk sampel *pre-roasted* 610 °C sebesar 2.72 %. Jenis perlakuan awal sampel *leaching* juga mempengaruhi rekoveri Cr. Terbukti dengan melakukan *leaching* pada *pre-roasted ore* rekoveri Cr menjadi lebih tinggi dibanding *leaching raw ore*. Tidak hanya itu proses *leaching pre-roasted* 610 °C menyebabkan rekoveri *leaching* lebih cepat mencapai titik setimbang. Rekoveri *leaching* tertinggi didapatkan pada *leaching pre-roasted ore* 610 °C dengan kondisi operasi *leaching* 2 M asam sulfat, rasio padat-cair 5 g/50 mL, 200 rpm, selama 120 menit, pada suhu *leaching* 90 °C, pada kondisi tersebut rekoveri Cr mencapai 53.16 %. *Leaching* Cr dari ketiga sampel yang diobservasi dikontrol oleh proses difusi melalui lapisan abu dengan nilai E_A masing-masing sebesar 21.41, 18.64, dan 14.71 kJ/mol serta k_0 sebesar 1.11, 0.55, dan 0.16 untuk *raw ore*, *pre-roasted ore* 280 °C, dan *pre-roasted ore* 610 °C. Dari penelitian ini didapatkan bahwa dengan melakukan proses *pre-roasting* dapat menurunkan nilai E_A yang menyebabkan proses *leaching* Cr lebih mudah.

ACKNOWLEDGEMENT

Terimakasih diucapkan kepada Politeknik ATI Makassar atas dukungan yang diberikan dalam bentuk pendanaan penelitian yang berasal dari DIPA Politeknik ATI Makassar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Gultom and A. Sianipar, "High pressure acid leaching: A newly introduced technology in Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jan. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/413/1/012015.
- [2] M. Z. Mubarak, W. Astuti, and S. K. Chaerun, "Leaching Behaviour of Nickel from Indonesian Laterite Ore in Some Organic Acids," in *The XIIIth International Mineral Processing Symposium*, Turkey: Istanbul Teknik Universitesi, Oct. 2011, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/280520509>
- [3] W. Astuti, T. Hirajima, K. Sasaki, and N. Okibe, "Kinetics of nickel extraction from Indonesian saprolitic ore by citric acid leaching under atmospheric pressure," *Min Metall Explor*, vol. 32, no. 3, pp. 176–185, Aug. 2015, doi: 10.1007/BF03402286.
- [4] R. A. Meyers, *Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, 2nd ed., vol. I. New York, NY: Springer New York, 2021. doi: 10.1007/978-1-0716-1492-1.
- [5] 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.
- [6] R. G. McDonald and J. Li, "The High Temperature Co-Processing of Nickel Sulfide and Nickel Laterite Sources," *Minerals*, vol. 10, no. 4, p. 351, Apr. 2020, doi: 10.3390/min10040351.
- [7] C. H. KÖSE, "Hydrometallurgical Processing Of Lateritic Nickel Ores," Middle East Technical University, 2010.
- [8] S. Stopic and B. Friedrich, "Hydrometallurgical processing of nickel lateritic ores," *Vojnotehnicki glasnik*, vol. 64, no. 4, pp. 1033–1047, 2016, doi: 10.5937/vojtehg64-10592.
- [9] F. Aryanhi and R. T. Jayanti, "Enhancing the Nickel Recovery of Morowali Nickel Laterite in Atmospheric Citric Acid Leaching," in *Proceedings of the 2nd Faculty of Industrial Technology International Congress*, Faculty of Industry Technology International Congress, Jan. 2020, pp. 38–42.
- [10] R. E. Delina, C. Arcilla, T. Otake, J. J. Garcia, M. Tan, and A. Ito, "Chromium occurrence in a nickel laterite profile and its implications to surrounding surface waters," *Chem Geol*, vol. 558, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.chemgeo.2020.119863.
- [11] 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, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.hydromet.2015.11.004.
- [12] G. Godgul and K. C. Sahu, "Chromium contamination from chromite mine," *Environmental Geology*, vol. 25, no. 4, pp. 251–257, Jun. 1995, doi: 10.1007/BF00766754.
- [13] G. Prameswara, F. Y. P. Tyassena, I. Amin, and H. Hatimah, "Optimization Of Laterite Ore Grinding Process Using Ball Mill With Response Surface Method," *Metallurgi*, vol. 37, no. 3, pp. 119–126, 2022.
- [14] G. Prameswara, F. Y. P. Tyassena, M. Pasaribu, I. Trisnawati, and H. T. B. M. Petrus, "Nickel Recovery Optimization and Kinetic Study of Morowali Laterite Ore," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 76, no. 5, pp. 1341–1348, May 2023, doi: 10.1007/s12666-022-02858-1.
- [15] G. Prameswara, F. Y. P. Tyassena, M. Pasaribu, and I. N. Febryanzha, "Kinetika Leaching Ni dan Fe dari Bijih Laterit Tipe Limonite Morowali," *REACTOR: Journal of Research on Chemistry and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 57–62, 2022.
- [16] J. Li et al., "Effect of pre-roasting on leaching of laterite," *Hydrometallurgy*, vol. 99, no. 1–2, pp. 84–88, 2009, doi: 10.1016/j.hydromet.2009.07.006.
- [17] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3rd ed. Oregon: John Wiley and Sons, 1999. doi: 10.1201/9781420014389.ch11.
- [18] L. Panda, D. S. Rao, B. K. Mishra, and B. Das, "Characterization and dissolution of low-grade ferruginous nickel lateritic ore by sulfuric acid," 2014.
- [19] R. Fan and A. R. Gerson, "Mineralogical characterisation of Indonesian laterites prior to and post atmospheric leaching," *Hydrometallurgy*, vol. 134–135, pp. 102–109, 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.02.004.
- [20] G. Friedrich, "Genesis of Low-Grade Chromite Ore Deposits in Lateritic Soils from the Philippines," in *Ore Genesis*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1982, pp. 240–250. doi: 10.1007/978-3-642-68344-2_25.
- [21] M. A. Rhamdhani, P. C. Hayes, and E. Jak, "Nickel laterite part 2 - Thermodynamic analysis of phase transformations occurring during reduction roasting," *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 118, no. 3, pp. 146–155, Sep. 2009, doi: 10.1179/174328509X431409.
- [22] M. A. Rhamdhani, P. C. Hayes, and E. Jak, "Nickel laterite part 1 - Microstructure and phase characterisations during reduction roasting and leaching," *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 118,

- no. 3, pp. 129–145, 2009, doi: 10.1179/174328509X431391.
- [23] Q. Tian, “Thermodynamics of chromite ore oxidative *roasting* process,” *J. Cent. South Univ. Technol*, vol. 18, 2011, doi: 10.1007/s11771-011-0663-0.
- [24] S. Zheng, Y. Zhang, Z. Li, T. Qi, H. Li, and H. Xu, “Green metallurgical processing of chromite,” *Hydrometallurgy*, vol. 82, no. 3–4, pp. 157–163, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.hydromet.2006.03.014.
- [25] 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.
- [26] X.-B. Li, W.-B. Xu, Q.-S. Zhou, Z.-H. Peng, and G.-H. Liu, “*Leaching* kinetics of acid-soluble Cr(VI) from chromite ore processing residue with hydrofluoric acid,” *J. Cent. South Univ. Technol*, vol. 18, pp. 399–405, 2011, doi: 10.1007/s11771-011-0710-x.
- [27] X. Zhang, G. Li, J. Wu, N. Xiong, and X. Quan, “*Leaching* of Valuable Elements from the Waste Chromite Ore Processing Residue: A Kinetic Analysis,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 31, pp. 19633–19638, Aug. 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c02194.
- [28] C. K. Mohanty, S. S. Behera, S. K. Tripathy, and P. K. Parhi, “Extensive investigation on extraction and *leaching* kinetics study of Cu and Cr from spent catalyst using acetic acid,” *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26182-3.
- [29] 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,” *Min Metall Explor*, vol. 37, no. 4, pp. 1297–1305, Aug. 2020, doi: 10.1007/s42461-020-00220-x.