

STUDI KINETIKA EKSTRAKSI TEMBAGA DARI BIJIH ENARGIT DALAM LARUTAN ASAM SULFAT

Kostiawan Sukamto^{1*}, Isal Kamumu², Ahmad Kadir Kilo³, Akram La Kilo⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Kimia, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Jend. Sudirman No. 6, Kota Gorontalo, 96128I, Indonesia

*E-mail: kostiawan_sukamto@ung.ac.id

Riwayat Article

Received: 13 September 2025; Received in Revision: 26 September 2025; Accepted: 27 September 2025

Abstract (Verdana 8 font)

This study investigates the kinetics of copper extraction from enargite ore (Cu_3AsS_4) using sulfuric acid (H_2SO_4) solution with hydrogen peroxide (H_2O_2) as an oxidizing agent. Leaching experiments were carried out under various operating conditions, including H_2SO_4 concentrations (1, 1.5, and 2 M), H_2O_2 concentrations (1, 1.5, and 3 M), solid percentages (5%, 10%, and 15%), and temperatures (30, 40, and 50 °C), with a leaching time of up to 480 minutes. The results indicated that higher concentrations of H_2SO_4 and H_2O_2 significantly enhanced copper extraction efficiency, while increasing solid percentage reduced the leaching performance. The optimum condition was achieved at 2 M H_2SO_4 , 3 M H_2O_2 , 5% solids, and 50 °C, resulting in a maximum copper extraction of 97.95%. Kinetic analysis revealed that the leaching process was predominantly controlled by diffusion through a porous product layer based on the shrinking core model, but shifted to interface reaction control at higher temperatures. These findings provide new insights into the leaching mechanism of enargite ore and serve as a foundation for developing more efficient and environmentally friendly hydrometallurgical processes for copper recovery.

Keywords: Enargite, Copper Extraction, Leaching Kinetics, Hydrometallurgy

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kinetika ekstraksi tembaga dari bijih enargit (Cu_3AsS_4) menggunakan larutan asam sulfat (H_2SO_4) dengan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai oksidator. Proses pelindian dilakukan dengan variasi konsentrasi H_2SO_4 (1; 1,5; 2 M), H_2O_2 (1; 1,5; 3 M), persen padatan (5%; 10%; 15%), serta temperatur (30; 40; 50 °C), dengan waktu ekstraksi hingga 480 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi H_2SO_4 dan H_2O_2 meningkatkan persen ekstraksi tembaga, sedangkan kenaikan persen padatan justru menurunkan efisiensi pelindian. Kondisi optimum diperoleh pada H_2SO_4 2 M, H_2O_2 3 M, persen padatan 5%, dan temperatur 50 °C, dengan persen ekstraksi mencapai 97,95%. Analisis model kinetika mengungkapkan bahwa proses pelindian umumnya dikendalikan oleh difusi melalui lapisan produk padat berpori, tetapi pada temperatur tinggi cenderung dikendalikan oleh reaksi antarmuka. Temuan ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme pelindian enargit dan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi ekstraksi tembaga yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Keywords: Enargit, Ekstraksi Tembaga, Kinetika Ekstraksi, Hidrometalurgi

1. Introduction

Kebutuhan tembaga dalam industri semakin meningkat seiring dengan kemajuan teknologi dan pertumbuhan sektor-sektor seperti elektronik, konstruksi, dan transportasi. Permintaan ini diproyeksikan akan meningkat seiring dengan peningkatan kebutuhan teknologi hijau dan infrastruktur yang lebih baik (Đorđević et al., 2019; Elishkaki et al., 2018). Dalam beberapa studi, diperkirakan bahwa pertumbuhan permintaan tembaga dapat mencapai dua hingga tiga kali lipat dari tahun 2020 hingga 2050, mengingat peran tembaga yang sangat penting dalam aplikasi energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi (Lèbre et al., 2019; Rötzer & Schmidt, 2020). Namun, di balik meningkatnya permintaan ini, ketersediaan sumber bijih tembaga mengalami tantangan yang cukup signifikan. Deposit bijih tembaga yang dapat dieksploitasi dengan mudah dan memiliki kadar tinggi semakin menurun seiring waktu (Calvo et al., 2016; Vidal et al., 2019). Penurunan kadar tembaga ini menyebabkan semakin sulit dan mahal untuk mengekstraksi

tembaga dari bijih-bijih tersebut menggunakan metode konvensional seperti pirometalurgi (Đorđević et al., 2019; Vardner et al., 2023). Untuk itu, teknologi baru yang lebih efisien dan ramah lingkungan diperlukan untuk mengolah bijih tembaga dengan kadar rendah dan bijih yang kompleks. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah metode hidrometalurgi, yang menggunakan pelarut kimia untuk melarutkan tembaga dari bijih.

Salah satu keunggulan hidrometalurgi adalah kemampuannya untuk diekstraksi dari bijih dengan kadar rendah dan kompleks (Kusdarini et al., 2023). Metode ini juga menghasilkan konsentrasi logam yang lebih murni dibandingkan dengan teknik pirometalurgi (Fathoni & Mubarak, 2017). Selain itu, hidrometalurgi juga menawarkan dampak lingkungan yang lebih bersahabat. Proses ini umumnya mengonsumsi lebih sedikit energi dibandingkan dengan pirometalurgi yang biasanya memerlukan pemanasan ekstrem, menghasilkan emisi gas rumah kaca dan limbah berbahaya yang tinggi (Handayani, 2020; Nurfaidah et al., 2020).

Bijih enargit (Cu_3AsS_4) merupakan salah satu sumber tembaga yang sering ditemukan di alam. Mineral ini memiliki nilai ekonomi yang tinggi karena kandungan tembaganya, tetapi juga membawa tantangan besar dalam pengolahannya (Filippou et al., 2007; Safarzadeh, Moats, et al., 2014). Salah satu tantangan utama dalam ekstraksi tembaga dari bijih enargit adalah kandungan arsenik yang tinggi, yang dapat menyebabkan dampak lingkungan yang serius dan masalah kesehatan jika tidak dikelola dengan hati-hati. Selama proses ekstraksi, arsenik dapat terlepas dalam bentuk gas beracun seperti arsenik trioksida (As_2O_3), yang berpotensi mencemari udara dan membahayakan ekosistem sekitar (Chambers et al., 2012). Oleh karena itu, ekstraksi tembaga dari enargit memerlukan metode yang tidak hanya efisien dalam mengambil tembaga, tetapi juga dapat mengendalikan emisi arsenik dengan baik.

Untuk mengatasi tantangan ini, proses ekstraksi dengan metode hidrometalurgi menggunakan larutan asam sulfat menjadi salah satu metode yang lebih disukai dalam pengolahan bijih enargit. Proses ini bekerja dengan cara melarutkan tembaga ke dalam larutan asam sulfat, membentuk tembaga sulfat yang dapat diekstraksi lebih lanjut. Asam sulfat dipilih karena sifatnya yang dapat melarutkan berbagai senyawa sulfida, termasuk enargit, dalam kondisi tertentu (Jahromi & Ghahreman, 2019; Safarzadeh, Miller, et al., 2014). Namun, meskipun metode ini sudah digunakan secara luas, efisiensi ekstraksi tembaga masih dapat ditingkatkan dengan memahami lebih dalam mekanisme kinetika reaksi yang terjadi selama proses ekstraksi. Faktor-faktor seperti konsentrasi asam, temperatur, ukuran partikel bijih, jenis oksidator, dan waktu kontak antara bijih dengan larutan asam sulfat dapat mempengaruhi laju ekstraksi tembaga.

2. Methodology

2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas, spatula, pH meter, labu ukur, neraca analitik, penangas, *magnetic stirrer*, serta peralatan analisis laboratorium seperti *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), *X-Ray Fluorescence* (XRF), dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Sampel yang digunakan adalah Enargit (Cu_3AsS_4), yang berasal dari tambang yang terletak di Suwawa Timur, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo. Adapun bahan-bahan asam sulfat (H_2SO_4), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan aquadest.

2.2. Prosedur Penelitian

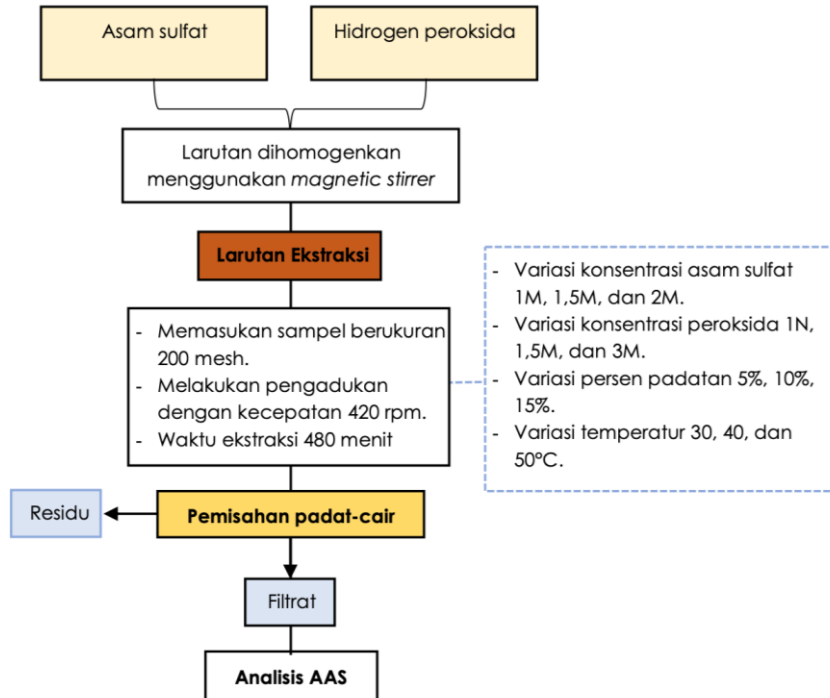
2.2.1 Preparasi Sampel

Proses preparasi dimulai dengan pengeringan sampel di dalam oven selama ± 1 jam pada suhu 100°C untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam sampel. Selanjutnya, sampel digerus menggunakan mortal dan alu untuk mendapatkan ukuran butir yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Proses pengayakan dilakukan dengan menggunakan alat sieve shaker untuk memperoleh sampel dengan ukuran 200 mesh. Untuk memastikan hasil sampel yang representatif, pengambilan contoh uji dilakukan menggunakan metode coning and quartering sampling. Terakhir, sampel yang telah dipreparasi dikarakterisasi menggunakan XRF dan XRD untuk mengetahui kandungan mineralnya.

2.2.2 Proses Ekstraksi

Ekstraksi tembaga dari sampel bijih enargit dilakukan menggunakan larutan asam sulfat (H_2SO_4) dengan penambahan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai oksidator. Tahap awal meliputi penyiapan 250 mL larutan ekstraksi dengan variasi konsentrasi asam sulfat 1 M, 1,5 M,

dan 2 M. Selanjutnya ditambahkan hidrogen peroksida 30% (v/v) dengan variasi konsentrasi 1 M, 1,5 M, dan 3 M, kemudian larutan dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer* dalam gelas kimia. Sampel bijih berukuran 200 mesh dimasukkan ke dalam larutan pengekstrak tersebut, dengan pengadukan pada kecepatan 420 rpm. Variasi persen padatan yang digunakan adalah 5%, 10%, dan 15%. Proses ekstraksi dilakukan pada temperatur 30, 40, dan 50 °C dengan waktu kontak hingga 480 menit. Setelah ekstraksi selesai, residu dipisahkan dari filtrat, dan filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan persen ekstraksi tembaga.



Gambar 1. Diagram alir proses ekstraksi

2.2.3 Analisis Data

Karakterisasi sampel enargit dilakukan menggunakan XRD untuk mengidentifikasi struktur kristal dan XRF untuk menentukan komposisi unsur kimia. XRD bekerja dengan prinsip difraksi sinar-X pada kisi kristal, menghasilkan pola difraksi khas yang merepresentasikan jenis mineral yang dianalisis (Ali et al., 2021). XRF digunakan untuk mengetahui komposisi kimia sampel, di mana atom yang tereksitasi oleh sinar-X berenergi tinggi akan memancarkan sinar-X sekunder dengan spektrum khas setiap unsur, sehingga konsentrasi unsur-unsurnya dapat diidentifikasi (Rampe et al., 2021). Sementara itu, analisis kuantitatif tembaga terlarut dalam filtrat hasil pelindian dilakukan menggunakan AAS, dengan konsentrasi dinyatakan dalam mg/L (ppm) dan berat logam terlarut dihitung berdasarkan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Persen ekstraksi} = \frac{\text{Berat logam terlarut}}{\text{Berat logam dalam sampel}} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

2.2.4 Penentuan Model Kinetika Reaksi Ekstraksi Tembaga

Penentuan model kinetika reaksi ekstraksi tembaga dari bijih enargit menggunakan 5 model kinetika yang ditinjau yaitu 3 model dari *shrinking core* dan 2 model dari *shrinking particle* (Levenspiel, 1999). Menurut Levenspiel, tiga model matematika untuk setiap jenis pengendali laju reaksi sesuai model *shrinking core* dapat dirumuskan melalui persamaan-persamaan berikut:

Difusi melalui film fluida pada permukaan bijih:

$$\frac{t}{\tau} = X_t \dots\dots\dots(2)$$

Difusi melalui lapisan produk padat yang tidak bereaksi:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - 3(1 - X_t)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X_t) \dots\dots\dots(3)$$

Reaksi antarmuka:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_t)^{\frac{1}{3}} \quad \frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(4)$$

Sementara itu, dua model matematika untuk setiap jenis pengendali laju reaksi sesuai model *shrinking particle* dapat dirumuskan melalui persamaan-persamaan berikut:

Proses yang terkendali laju difusi melalui lapis difusi melalui film fluida:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_t)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(5)$$

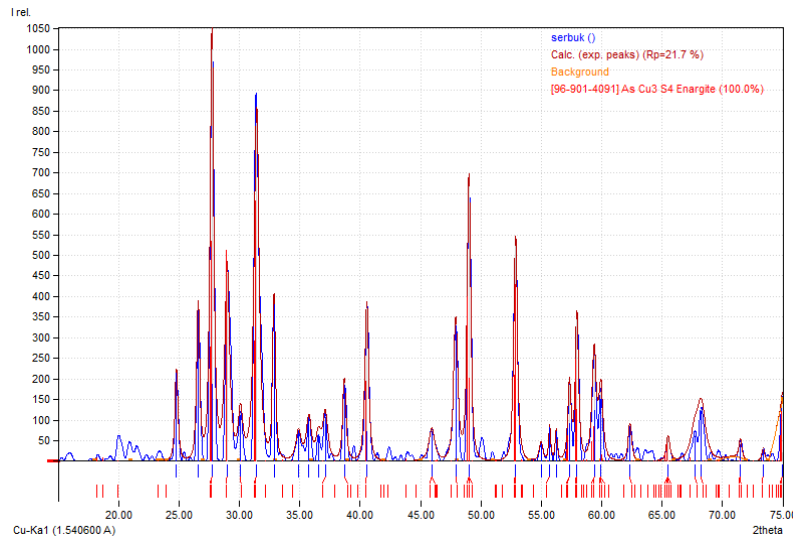
Proses yang terkendali laju reaksi antarmuka:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_t)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(6)$$

dimana t adalah waktu ekstraksi, τ adalah waktu pelindian dimana sulfida dalam bijih enargit dianggap habis bereaksi dan X_T adalah fraksi sulfida yang terkonversi pada waktu t . Inti yang menyusut diasumsikan hanya karena proses pelarutan enargit (Cu_3AsS_4) sehingga X_T dapat ditentukan dari mol terlarut sulfida-sulfida tersebut dengan mol awal sulfida dalam sampel.

3. Results and Discussion

3.1. Identifikasi Mineral dalam Sampel dengan Analis XRD



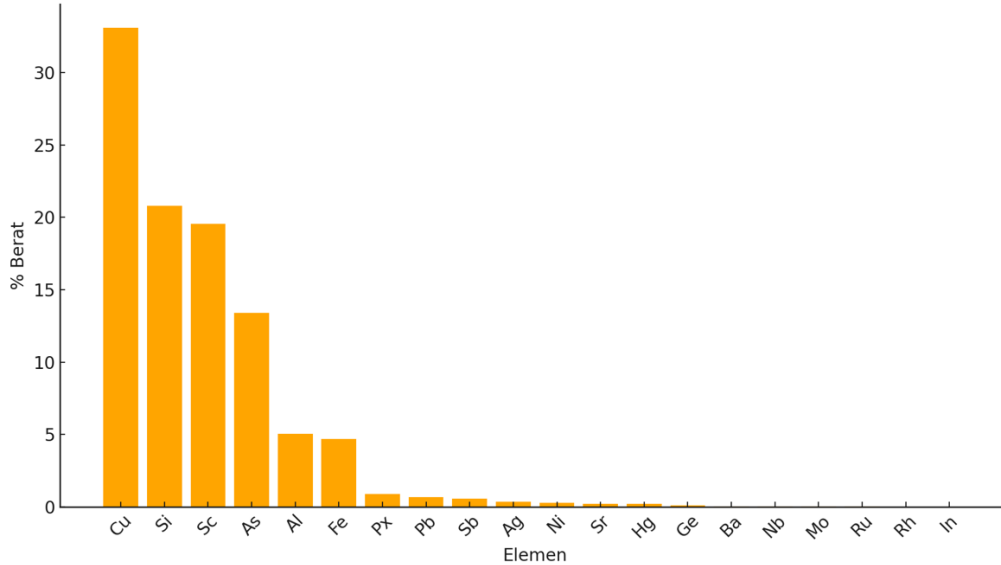
Gambar 2. Hasil analisis XRD sampel

Hasil XRD (Gambar 2; Cu-K α , $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$) menegaskan bahwa fase dominan pada sampel adalah enargit (Cu_3AsS_4 , monoklin). Pola eksperimen (garis biru) tumpang tindih dengan pola hitungan/calc (garis merah) yang dipadankan ke kartu basis data [96-901-4091] As Cu_3S_4 Enargite (100%), dengan nilai profile residual $R_p = 21,7\%$ sebagai indikator kecocokan yang memadai. Kecocokan ini tampak pada puncak-puncak intens utama sekitar $2\theta \approx 27-28^\circ$, $29-30^\circ$, $31-33^\circ$, $35-36^\circ$, $38-39^\circ$, $41-44^\circ$, dan $49-50^\circ$, yang merupakan karakteristik enargit. Tidak terlihat puncak kuat yang konsisten dengan kalkosit atau bornit, sehingga keberadaan fase sulfida lain, jika ada, bersifat minor. Konsistensi identifikasi ini juga sejalan dengan hasil XRF yang menunjukkan dominasi unsur Cu dan As pada sampel. Dengan demikian, keberadaan dan dominansi enargit pada batuan uji terbukti secara langsung dari analisis XRD yang ditampilkan pada Gambar 2, dan menjadi dasar pembahasan proses ekstraksi.

3.2. Analisis Komposisi Kimia Sampel Enargit

Berdasarkan hasil analisis XRF yang ditunjukkan pada Gambar 3, unsur utama yang terkandung dalam sampel enargit adalah tembaga (Cu) sebesar 33,08%, silikon (Si) 20,78%, skandium (Sc) 19,56%, arsen (As) 13,40%, aluminium (Al) 5,04%, dan besi (Fe) 4,70%. Keenam unsur

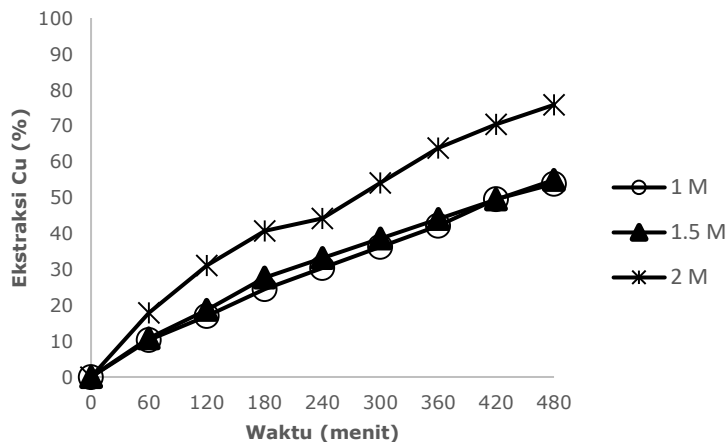
ini merupakan komponen mayor yang mendominasi sampel, sedangkan unsur lain seperti Pb, Sb, Ag, Ni, dan Sr hanya terdeteksi dalam jumlah relatif kecil (<1%). Dominansi unsur Cu dan As sejalan dengan identifikasi enargit (Cu₃AsS₄) dari analisis XRD, sehingga memperkuat bahwa sampel yang digunakan merupakan mineral enargit dengan kemurnian cukup tinggi. Visualisasi hasil XRF dalam bentuk diagram batang memudahkan untuk melihat kontribusi relatif tiap unsur dalam sampel, di mana Cu terlihat sebagai komponen paling dominan.



Gambar 3. Hasil analisis XRF sampel

3.3. Pengaruh Variasi Konsentrasi Asam Sulfat

Konsentrasi H₂SO₄ merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan pelindian bijih sulfida, termasuk enargit; semakin tinggi konsentrasi asam, semakin besar ketersediaan ion H⁺ yang dapat berinteraksi dengan mineral, sehingga laju pelarutan tembaga berpotensi meningkat. Hasil penelitian (Gambar 4) menunjukkan tren kenaikan persen ekstraksi seiring meningkatnya konsentrasi H₂SO₄, yakni 53,82% pada 1 M, 54,90% pada 1,5 M, dan 75,82% pada 2 M setelah 480 menit. Temuan tersebut menegaskan peran langsung ion H⁺ dalam mempercepat pelarutan enargit, sekaligus memperbaiki kondisi kimia larutan sehingga efisiensi pelindian meningkat (Karimova et al., 2024; Petrović et al., 2023; Toro et al., 2019).



Gambar 4. Profil persen ekstraksi tembaga sebagai fungsi waktu pada berbagai konsentrasi asam sulfat

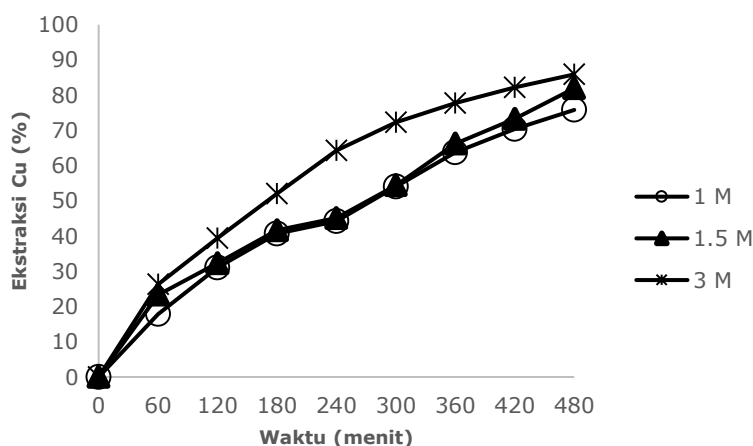
Secara stoikiometri, mekanisme reaksi pelarutan enargit oleh asam sulfat dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:



Kenaikan konsentrasi H^+ mendorong pembentukan $CuSO_4$ terlarut dan menggeser kesetimbangan ke arah produk, sehingga persen ekstraksi tembaga meningkat bersama konsentrasi asam. Keberadaan belerang elemental (S^0) sebagai produk padat memang berpotensi membentuk lapisan pasif pada permukaan partikel; namun, pada rentang kondisi ini, efek protonasi yang lebih kuat tetap mendominasi sehingga laju ekstraksi bersih tetap meningkat.

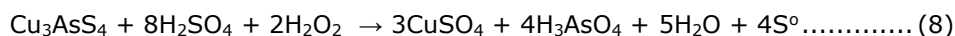
3.4. Pengaruh Variasi Konsentrasi Hidrogen Peroksida

Hidrogen peroksida berperan sebagai oksidator yang meningkatkan kelarutan tembaga dari enargit di media asam; oksidasi spesies tembaga dan arsen menaikkan kondisi redoks larutan sehingga spesies Cu^{2+} stabil terbentuk sebagai $CuSO_4$ (Bogdanović et al., 2020; Moraga et al., 2021). Secara eksperimental (Gambar 5), kenaikan konsentrasi H_2O_2 memberikan peningkatan persen ekstraksi yang nyata: pada 1 M diperoleh 75,82%, naik menjadi 81,96% pada 1,5 M, dan mencapai 85,92% pada 3 M (pada H_2SO_4 2 M). Peningkatan ini menunjukkan bahwa suplai oksidator yang lebih besar mempercepat konversi tembaga ke bentuk terlarut, sejalan dengan peran H_2O_2 dalam memperbaiki lingkungan redoks sistem pelindian.



Gambar 5. Profil persen ekstraksi tembaga sebagai fungsi waktu pada berbagai konsentrasi peroksida

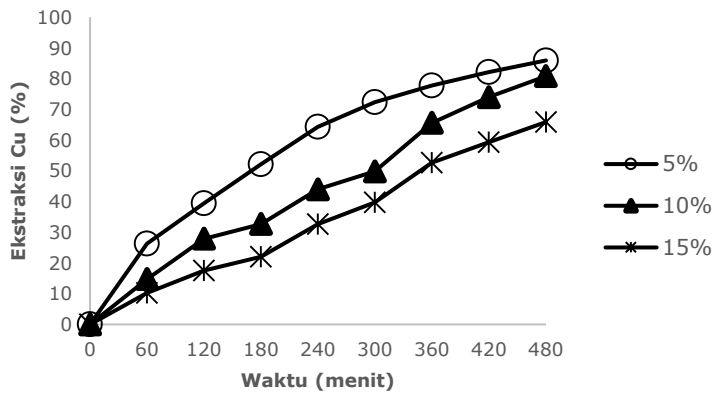
Mekanisme keseluruhan pelarutan enargit dalam media asam dengan kehadiran H_2O_2 dapat ditunjukkan pada persamaan reaksi berikut:



Persamaan reaksi tersebut menunjukkan bahwa H_2O_2 mengoksidasi arsen menjadi H_3AsO_4 dan memfasilitasi pelepasan Cu^{2+} ke larutan sebagai $CuSO_4$. Dalam proses ini, proton dari H_2SO_4 memutus ikatan pada kisi sulfida, sedangkan H_2O_2 menaikkan potensial oksidasi larutan (mis. $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$) yang mendorong transformasi $Cu^+ \rightarrow Cu^{2+}$ dan $As(III) \rightarrow As(V)$, sehingga spesies arsen stabil sebagai H_3AsO_4 . Dengan meningkatnya konsentrasi H_2O_2 , jalur oksidatif ini menjadi lebih dominan sehingga laju dan derajat ekstraksi tembaga meningkat. Meskipun belerang elemental (S^0) berpotensi mempasifkan permukaan partikel, pada rentang kondisi ini lingkungan yang lebih oksidatif dan keberlimpahan H^+ lebih menentukan, sehingga persen ekstraksi tetap meningkat seiring penambahan H_2O_2 .

3.5. Pengaruh Variasi Persen Padatan

Persen padatan menentukan perbandingan antara jumlah sampel bijih dengan volume larutan pelindian, sehingga berpengaruh langsung terhadap ketersediaan ion H^+ dan oksidator dalam sistem. Pada kondisi operasi tetap (H_2SO_4 2 M, H_2O_2 3 M, suhu 30 °C, dan waktu pelindian 480 menit), digunakan variasi persen padatan sebesar 5%, 10%, dan 15% untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap efektivitas pelindian tembaga dari enargit.

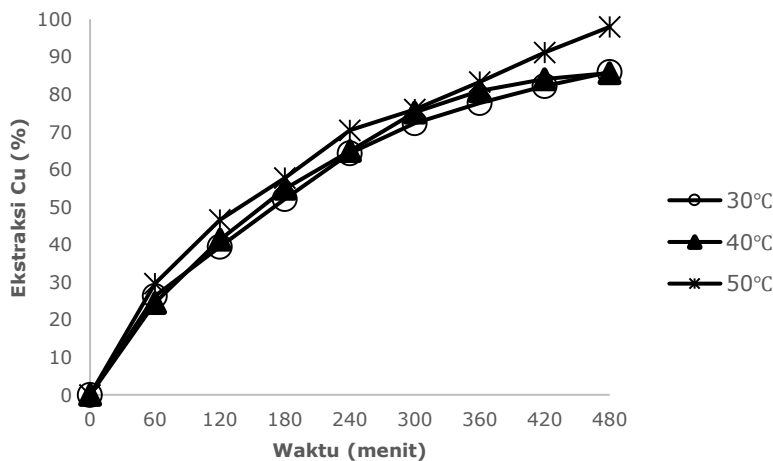


Gambar 6. Profil persen ekstraksi tembaga sebagai fungsi waktu pada berbagai variasi persen padatan

Peningkatan persen padatan (*pulp density*) menurunkan efisiensi ekstraksi tembaga dari enargit. Data pada Gambar 6 menunjukkan bahwa persen ekstraksi tertinggi diperoleh pada 5% padatan (85,91%), kemudian turun pada 10% padatan (80,79%) dan paling rendah pada 15% padatan (65,86%). Secara mekanistik, kenaikan padatan memperkecil rasio reagen terhadap massa bijih sehingga ketersediaan efektif H^+ dan oksidator per partikel menurun. Selain itu viskositas *slurry* meningkat, difusi spesies ke/dari permukaan partikel terhambat, dan kontak efektif reagen-mineral berkurang (*crowding*) (Nurtazina et al., 2022; Pan et al., 2024). Akumulasi produk padat belerang elemental (S^0) juga lebih mudah membentuk lapisan pasif pada permukaan ketika padatan tinggi, sehingga memperbesar hambatan perpindahan massa. Pada padatan tinggi, pasokan H_2SO_4 dan H_2O_2 per mol enargit (rasio $R_{acid/ore}$) menurun terhadap kebutuhan stoikiometrik di antarmuka, sehingga laju reaksi berkurang dan kendala perpindahan massa menjadi lebih dominan. Kombinasi faktor-faktor ini menjelaskan penurunan laju dan derajat pelindian pada padatan 10–15%, sedangkan padatan 5% memberi kondisi hidrodinamika dan ketersediaan reagen yang lebih menguntungkan.

3.6. Pengaruh Variasi Temperatur

Setelah diperoleh kondisi optimum pada variasi konsentrasi asam sulfat, hidrogen peroksida, dan pengaruh persen padatan, tahap berikutnya adalah mengevaluasi pengaruh temperatur terhadap ekstraksi tembaga dari enargit. Temperatur merupakan salah satu parameter penting dalam proses pelindian karena dapat memengaruhi laju reaksi dan mekanisme pelarutan mineral. Data pada Gambar 7 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap persen ekstraksi yaitu 85,92% pada 30 °C, 85,67% pada 40 °C, dan meningkat tajam menjadi 97,95% pada 50 °C.



Gambar 7. Profil persen ekstraksi tembaga sebagai fungsi waktu pada berbagai variasi temperature

Peningkatan temperatur mempercepat ekstraksi karena beberapa faktor yang saling menguatkan: (i) secara kinetika kimia, konstanta laju reaksi meningkat mengikuti persamaan Arrhenius $k = Ae^{-Ea/RT}$, sehingga bila pengendalian bergeser ke reaksi antarmuka, laju pelarutan

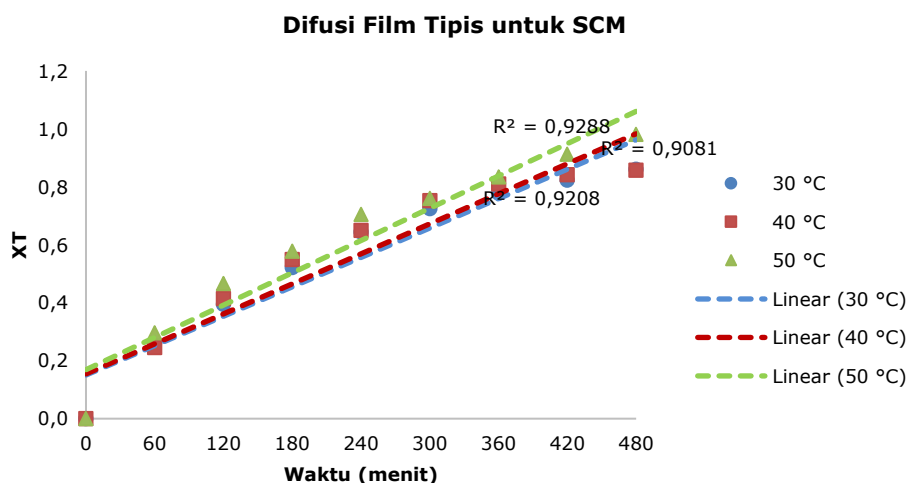
enargit naik tajam; (ii) secara transport massa, naiknya T menurunkan viskositas *slurry* dan menipiskan lapisan batas difusi, sehingga koefisien difusi spesies reagen (H^+ , H_2O_2) dan produk meningkat; (iii) secara redoks, suhu yang lebih tinggi membuat H_2O_2 lebih reaktif sebagai oksidator efektif, mempercepat transformasi $Cu^+ \rightarrow Cu^{2+}$ dan $As(III) \rightarrow As(V)$ sehingga $CuSO_4$ dan H_3AsO_4 stabil di larutan; (iv) pada padatan, temperatur dapat mengubah morfologi/porositas lapisan produk belerang elemental (S^0) sehingga resistansinya terhadap difusi berkurang (Pérez et al., 2020; Tanda et al., 2021). Kombinasi faktor-faktor ini menjelaskan mengapa pada 30–40 °C perubahan persen ekstraksi relatif kecil (85,92%→85,67%), kemungkinan karena hambatan difusi dan pasivasi S^0 masih dominan, sedangkan pada 50 °C hambatan tersebut berkurang dan kontribusi reaksi antarmuka meningkat, sehingga ekstraksi melonjak menjadi 97,95% (Gambar 7). Kecenderungan ini sejalan dengan literatur pelindian sulfida dan konsisten dengan analisis kinetika yang menunjukkan pergeseran mekanisme pada suhu lebih tinggi.

3.6. Studi Kinetika Ekstraksi

Studi kinetika ekstraksi dilakukan untuk mengetahui pengendali laju proses pelindian, konstanta laju reaksi, energi aktivasi pelindian dan model yang mendekati perilaku pelarutan tembaga dari sampel enargit dalam asam sulfat menggunakan oksidator peroksida. Analisis model kinetika dilakukan dengan membandingkan hasil pengaluran data percobaan pelindian terhadap persamaan masing-masing model. Proses dianggap terkendali oleh laju difusi melalui film fluida apabila pengaluran menunjukkan hubungan linier, yang ditentukan berdasarkan nilai R^2 dari persamaan regresi.

3.6.1 Pencocokan Data Percobaan dengan Model Kinetika yang Terkendali oleh Laju Difusi Melalui Film Fluida untuk SCM

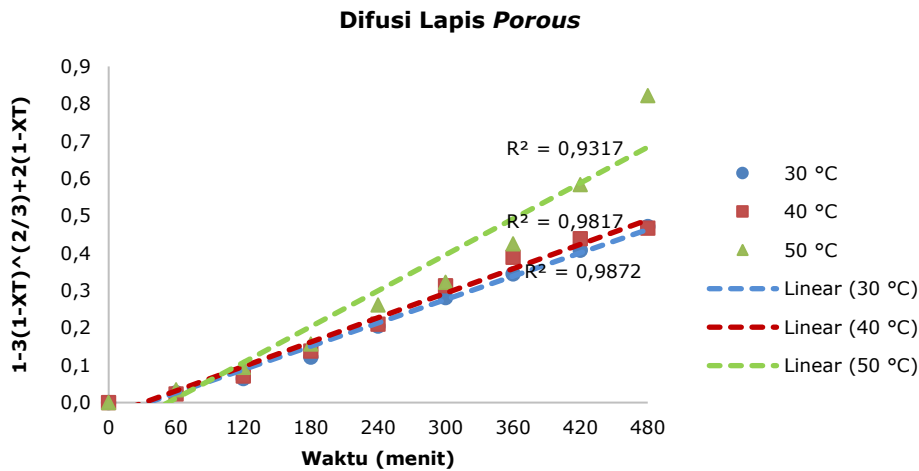
Proses terkendali oleh laju difusi melalui film fluida bila pengaluran antara X_T terhadap (t) menghasilkan hubungan yang linier. Untuk melihat kelinieran dari pengaluran X_T terhadap waktu (t) dilakukan berdasarkan harga R^2 dari persamaan regresi yang diperoleh dari pengaluran tersebut. Hasil pengaluran X_t terhadap waktu (t) berdasarkan data percobaan pelindian pada temperatur 30°C, 40°C, dan 50°C ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik X_T vs t pada berbagai temperature

3.6.2 Pencocokan Data Percobaan dengan Model Kinetika yang Terkendali oleh Laju Difusi Melalui Lapisan Produk Padat Porous

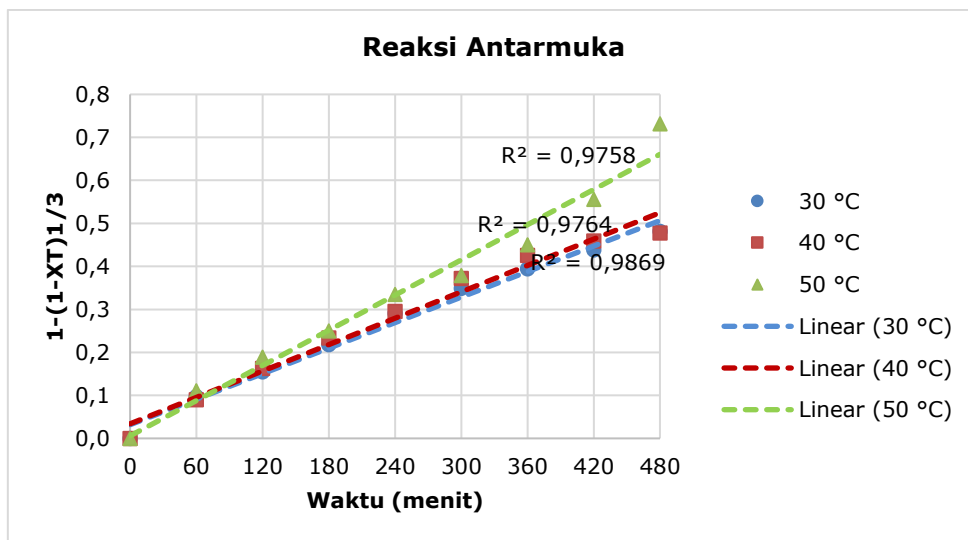
Proses terkendali oleh laju difusi melalui lapisan produk padat *porous* bila pengaluran antara $(1-3(1-X_T)^{2/3} + 2(1-X_T))$ terhadap (t) menghasilkan hubungan yang linier. Hasil pengaluran $(1-3(1-X_T)^{2/3} + 2(1-X_T))$ terhadap waktu (t) berdasarkan data percobaan pelindian pada temperatur 30°C, 40°C, dan 50°C ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik $(1-3(1-X_T)^{2/3} + 2(1-X_T))$ vs t pada berbagai temperature

3.6.3 Pencocokan Data Percobaan dengan Model Kinetika yang Terkendali oleh Reaksi Antarmuka

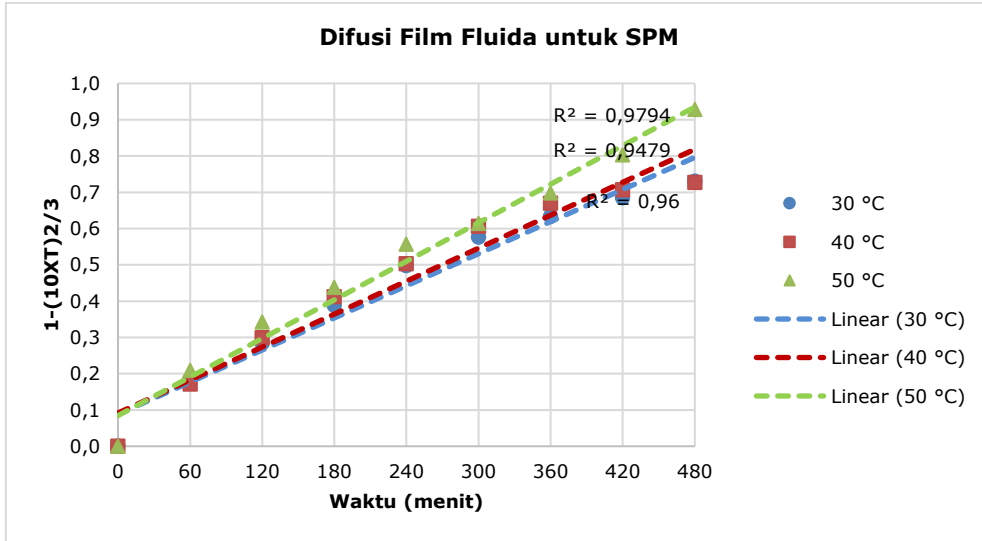
Proses terkendali oleh reaksi antarmuka bila pengaluran antara $1-(1-X_T)^{1/3}$ terhadap (t) menghasilkan hubungan yang linier. Hasil pengaluran $1-(1-X_T)^{1/3}$ terhadap waktu (t) berdasarkan data percobaan pelindian pada temperatur 30°C, 40°C, dan 50°C, ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik $1-(1-X_T)^{1/3}$ vs t pada berbagai temperature

3.6.4 Pencocokan Data Percobaan dengan Model Kinetika yang Terkendali oleh Laju Difusi Melalui Film Fluida untuk SPM

Proses terkendali oleh laju difusi melalui film fluida bila pengaluran antara $1-(1-X_T)^{2/3}$ terhadap (t) menghasilkan hubungan yang linier. Hasil pengaluran $1-(1-X_T)^{2/3}$ terhadap waktu (t) berdasarkan data percobaan pelindian pada temperatur 30°C, 40°C, dan 50°C ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 11. Grafik $1-(1-X_T)^{2/3}$ vs t pada berbagai temperatur

Berdasarkan data pengaluran pada berbagai temperatur, nilai R^2 untuk kelima model kinetika disajikan pada Tabel 1. Penentuan pengendali reaksi dilakukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) dari regresi linier, di mana model yang memiliki nilai R^2 paling mendekati 1 dianggap paling sesuai untuk menggambarkan mekanisme pelindian.

Tabel 1. Nilai R^2 untuk setiap pencocokan data hasil percobaan dengan 5 model kinetika.

Model SCM	Nilai R^2		
	30 °C	40 °C	50 °C
Laju difusi melalui film fluida	0,9208	0,9081	0,9000
Laju difusi melalui lapisan padat <i>porous</i>	0,9872	0,9817	0,9824
Laju difusi melalui reaksi antarmuka	0,9869	0,9764	0,9839
Model SPM	Nilai R^2		
	30 °C	40 °C	50 °C
Laju difusi melalui film fluida	0,9600	0,9479	0,9514
Laju difusi melalui reaksi antarmuka	0,9869	0,9764	0,9839

Nilai koefisien determinasi (R^2) pada Tabel 1 menunjukkan bahwa ekstraksi tembaga dari enargit paling sesuai dengan model *shrinking core* yang dikendalikan difusi melalui lapisan produk berpori pada 30–40 °C ($R^2 = 0,9872$ dan $0,9817$). Hal ini mengindikasikan bahwa selama reaksi berlangsung, terbentuk lapisan hasil reaksi (produk padat) di sekitar partikel bijih yang bersifat berpori. Lapisan ini berperan sebagai penghalang utama bagi penetrasi ion H^+ dan oksidator ke dalam inti partikel (Hao et al., 2022; Karimov et al., 2020; Sabzevari et al., 2019). Akibatnya, meskipun konsentrasi reagen di larutan cukup tinggi, transportasi reagen menuju inti bijih berlangsung lambat sehingga laju reaksi lebih banyak ditentukan oleh kemampuan reagen untuk berdifusi melalui lapisan tersebut. Kondisi ini umum terjadi pada pelindian bijih sulfida, di mana pembentukan lapisan pasif sering menjadi faktor pembatas yang menurunkan efisiensi ekstraksi. Dengan demikian, difusi menjadi tahapan pembatas laju dalam mekanisme pelindian pada sebagian besar kondisi temperatur.

Namun, pada temperatur tinggi (50 °C), mekanisme pelindian cenderung bergeser dan lebih sesuai dengan model yang dikendalikan oleh reaksi antarmuka. Kecocokan model reaksi antarmuka sedikit lebih tinggi ($R^2 = 0,9839$) dibanding lapisan produk ($R^2 = 0,9824$), sejalan dengan lonjakan persen ekstraksi dari ~86% ke 97,95% pada Gambar 7. Peningkatan suhu tidak hanya mempercepat energi kinetik molekul reagen, tetapi juga dapat mengurangi ketebalan dan resistansi lapisan produk yang terbentuk, sehingga kontak langsung antara reagen dengan permukaan bijih menjadi lebih dominan (Mubarak, 2020; Qiao et al., 2018).

Kondisi ini menggambarkan bahwa pada temperatur tinggi, hambatan difusi dapat diminimalkan karena energi kinetik partikel lebih besar dan viskositas larutan menurun, sehingga reaksi antarmuka lebih dominan dalam mengendalikan proses pelindian tembaga. Dalam kondisi ini, kecepatan pelarutan lebih banyak ditentukan oleh reaksi kimia di antarmuka padat-cair daripada proses difusi. Hal ini menjelaskan mengapa nilai R^2 untuk model reaksi antarmuka lebih mendekati 1 pada temperatur 50 °C. Dengan demikian, kenaikan temperatur mampu mengubah mekanisme pengendali laju dari difusi menuju reaksi antarmuka, yang menandakan adanya peluang optimasi kondisi operasi untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi tembaga dari enargit.

4. Conclusion

Penelitian ini menunjukkan bahwa ekstraksi tembaga dari bijih enargit menggunakan larutan asam sulfat dengan oksidator hidrogen peroksida sangat dipengaruhi oleh variasi konsentrasi H_2SO_4 , H_2O_2 , persen padatan, dan temperatur. Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi H_2SO_4 2 M, H_2O_2 3 M, persen padatan 5%, dan temperatur 50 °C, dengan persen ekstraksi tembaga mencapai 97,95%. Analisis kinetika mengindikasikan bahwa pada sebagian besar kondisi, proses pelindian dikendalikan oleh difusi melalui lapisan produk padat berpori sesuai model *shrinking core*. Namun, pada temperatur tinggi, mekanisme bergeser dan lebih sesuai dengan model reaksi antarmuka. Hasil ini menegaskan pentingnya pengendalian parameter operasi untuk meningkatkan efisiensi pelindian sekaligus memberikan dasar bagi optimasi proses hidrometalurgi pada bijih enargit.

Acknowledgement

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Negeri Gorontalo atas dukungan pendanaan melalui Hibah Riset Akselerasi Publikasi Nasional (RAPN) 2025, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

References

- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2021). *X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202112.0438.V1>
- Bogdanović, G. D., Petrović, S., Sokić, M., & Antonijević, M. M. (2020). Chalcopyrite leaching in acid media: a review. *Metallurgical and Materials Engineering*, 26(2), 177–198. <https://doi.org/10.30544/526>
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A., & Valero, A. (2016). Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/RESOURCES5040036>
- Chambers, B., Pickles, C. A., & Peacey, J. G. (2012). Thermodynamic analysis of the sulphation roasting of enargite concentrates. *High Temperature Materials and Processes*, 31(4–5), 613–625. <https://doi.org/10.1515/HTMP-2012-0099/PDF>
- Đorđević, B., Popović, G., & Milanović, D. (2019). The effect of macroeconomic determinants of the Chinese economy on the copper price movements. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1–2, 91–106. <https://doi.org/10.5937/MMEB1902091D>
- Elshkaki, A., Graedel, T. E., Ciacci, L., & Reck, B. K. (2018). Resource Demand Scenarios for the Major Metals. *Environmental Science & Technology*, 52(5), 2491–2497. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.7B05154>
- Fathoni, M. W., & Mubarok, M. Z. (2017). Study of Copper Recovery from Spent Electrolyte Silver by Solvent Extraction – Electrowinning Using Mextral 5640 H. *Metalurgi*, 32(1), 9. <https://doi.org/10.14203/METALURGI.V32I1.163>
- Filippou, D., St-Germain, P., & Grammatikopoulos, T. (2007). Recovery of Metal values from Copper-Arsenic Minerals and other Related Resources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 28(4), 247–298. <https://doi.org/10.1080/08827500601013009>
- Handayani, S. (2020). Penggunaan mikroorganisme dalam industri pemrosesan mineral. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 16(2), 57–68. <https://doi.org/10.30556/JTMB.VOL16.NO2.2020.1088>

- Hao, J., Wang, X., Wang, Y., Wu, Y., & Guo, F. (2022). Optimizing the Leaching Parameters and Studying the Kinetics of Copper Recovery from Waste Printed Circuit Boards. *ACS Omega*, 7(4), 3689–3699. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.1C06173>
- Jahromi, F. G., & Ghahreman, A. (2019). Effect of Surface Modification with Different Acids on the Functional Groups of AF 5 Catalyst and Its Catalytic Effect on the Atmospheric Leaching of Enargite. *Colloids and Interfaces*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/COLLOIDS3020045>
- Karimov, K. A., Rogozhnikov, D. A., Kuzas, E. A., & Shoppert, A. A. (2020). Leaching Kinetics of Arsenic Sulfide-Containing Materials by Copper Sulfate Solution. *Metals*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/MET10010007>
- Karimova, L., Makasheva, G., Zakharyan, D., Malyshev, V., & Kharchenko, Y. (2024). Studies on Extraction of Copper From Sulfuric Acid Solution After Thermochemical Enrichment of Rough Concentrate. *Acta Metallurgica Slovaca*, 30(2), 64–71. <https://doi.org/10.36547/AMS.30.2.2020>
- Kusdarini, E., Saleky, D. B., & Sari, A. S. (2023). Recovery Tembaga Menggunakan Asam Sulfat. *Jurnal GEOSAPTA*, 9(1), 33. <https://doi.org/10.20527/JG.V9I1.14572>
- Lèbre, É., Owen, J. R., Corder, G. D., Kemp, D., Stringer, M., & Valenta, R. K. (2019). Source Risks As Constraints to Future Metal Supply. *Environmental Science & Technology*, 53(18), 10571–10579. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.9B02808>
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3th editio). John Wiley & Sons.
- Moraga, G. A., Jamett, N. E., Hernández, P. C., Graber, T. A., & Taboada, M. E. (2021). Chalcopyrite Leaching with Hydrogen Peroxide and Iodine Species in Acidic Chloride Media at Room Temperature: Technical and Economic Evaluation. *Metals*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/MET11101567>
- Mubarak, Y. A. (2020). Leaching of Copper Ores: Effects of Operating Variables. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4226–4235. <https://doi.org/10.30534/IJETER/2020/31882020>
- Nurfaidah, A. Y., Lestari, D. P., Azzahra, R. T., & Suminar, D. R. (2020). Pengaruh Suhu dan Konsentrasi terhadap Proses Pemisahan Nikel dari Logam Pengotor Menggunakan Metode Leaching. *Fluida*, 13(2), 81–92. <https://doi.org/10.35313/FLUIDA.V13I2.2388>
- Nurtazina, N., Uvarov, N., Azhigulova, R., & Tyapkin, P. (2022). Chalcopyrite leaching by amino acid solutions in the presence of hydrogen peroxide. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 58(6). <https://doi.org/10.37190/PPMP/157067>
- Pan, Z., Jian, C., Peng, Z., Fu, X., He, R., Yue, T., & Sun, W. (2024). Study on Process Mineralogy of the Combined Copper Oxide Ore in Tibet and Acid Leaching Behavior with Calcium Fluoride. *Minerals*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/MIN14040352>
- Pérez, K., Jeldres, R. I., Nieto, S., Salinas-Rodríguez, E., Robles, P., Quezada, V., Hernández-ávila, J., & Toro, N. (2020). Leaching of Pure Chalcocite in a Chloride Media Using Waste Water at High Temperature. *Metals*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/MET10030384>
- Petrović, S. J., Bogdanović, G. D., Antonijević, M. M., Vukčević, M., & Kovačević, R. (2023). The Extraction of Copper from Chalcopyrite Concentrate with Hydrogen Peroxide in Sulfuric Acid Solution. *Metals*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/MET13111818>
- Qiao, Y., Diao, J., Liu, D., Yang, J., Guo, D., Gong, S., & Xie, B. (2018). Dephosphorisation of steel slags by leaching with sulphuric acid. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 127(4), 250–254. <https://doi.org/10.1080/03719553.2017.1412096>
- Rampe, E., Blake, D., Sarrazin, P., Bristow, T., Gailhanou, M., Lafuente, B., Tu, V., Zacny, K., & Downs, R. (2021). CheMinX: A Next Generation XRD/XRF for Quantitative Mineralogy and Geochemistry on Mars. *Bulletin of the AAS*, 53(4). <https://doi.org/10.3847/25C2CFEB.A4A55445>
- Rötzer, N., & Schmidt, M. (2020). Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change. *Resources*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9040044>
- Sabzezari, B., Koleini, S. M. J., Ghassa, S., Shahbazi, B., & Chelgani, S. C. (2019). Microwave-Leaching of Copper Smelting Dust for Cu and Zn Extraction. *Materials*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/MA12111822>
- Safarzadeh, M. S., Miller, J. D., & Huang, H. H. (2014). Thermodynamic Analysis of the Cu-As-S-(O) System Relevant to Sulfuric Acid Baking of Enargite at 473 K (200 °C). *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(2), 568–581. <https://doi.org/10.1007/S11663-013-9965-Y>

- Safarzadeh, M. S., Moats, M. S., & Miller, J. D. (2014). Recent Trends in the Processing of Enargite Concentrates. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 35(5), 283–367. <https://doi.org/10.1080/08827508.2012.723651>
- Tanda, B. C., Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2021). Kinetics of malachite leaching in alkaline glycine solutions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 130(1), 16–24. <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1505211>
- Toro, N., Briceño, W., Pérez, K., Cánovas, M., Trigueros, E., Sepúlveda, R., & Hernández, P. (2019). Leaching of Pure Chalcocite in a Chloride Media Using Sea Water and Waste Water. *Metals*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/MET9070780>
- Vardner, J. T., Inaba, Y., Jung, H., Farinato, R. S., Nagaraj, D. R., Banta, S., & West, A. C. (2023). The Reductive Leaching of Chalcopyrite by Chromium(II) Chloride for the Rapid and Complete Extraction of Copper. *ChemistryOpen*, 12(1). <https://doi.org/10.1002/OPEN.202200196>
- Vidal, O., Rostom, F. Z., François, C., & Giraud, G. (2019). Prey–Predator Long-Term Modeling of Copper Reserves, Production, Recycling, Price, and Cost of Production. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11323–11336. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.9B03883>