

Optimasi Kinetika Pelindian Emas Alternatif Menggunakan Ligan ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) Pada Bijih Emas Refraktori (*Optimization of Alternative Gold Leaching Kinetics Using Glycine Ligand ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) on Refractory Gold Ores*)

Muhamad Muflich Dhiya'ulhaq
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
ulhaqmufli21@gmail.com

Abstrak

Industri pertambangan emas secara global menghadapi tantangan lingkungan akibat penggunaan ekstensif sianida, khususnya pada ekstraksi bijih emas refraktori. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi ligan glisin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) sebagai alternatif ramah lingkungan (biodegradable dan nontoksik) melalui optimasi parameter kinetik pelindian. Pendekatan studi literatur digunakan dengan menganalisis 26 artikel ilmiah relevan dari pangkalan data terkemuka. Hasil sintesis menunjukkan bahwa laju disolusi glisin murni secara inheren lambat pada suhu ruang. Namun, penambahan agen pengoksidasi kuat (seperti kalium permanganat) dan peningkatan suhu operasi hingga 60°C mampu mendobrak hambatan energi aktivasi secara signifikan. Secara khusus, integrasi sistem hibrida tiosulfat-glisin bersinergi terbukti menghasilkan perolehan emas mencapai 93,7% dalam 12 jam pada 40°C . Efektivitas sistem glisin dapat dikatalisis secara absolut melalui manajemen suhu dan agen pengoksidasi, menjadikannya alternatif ekstraksi yang berkelanjutan, efisien, dan ramah ekosistem untuk transisi metalurgi hijau.

Kata Kunci: emas, glisin, pelindian, refraktori.

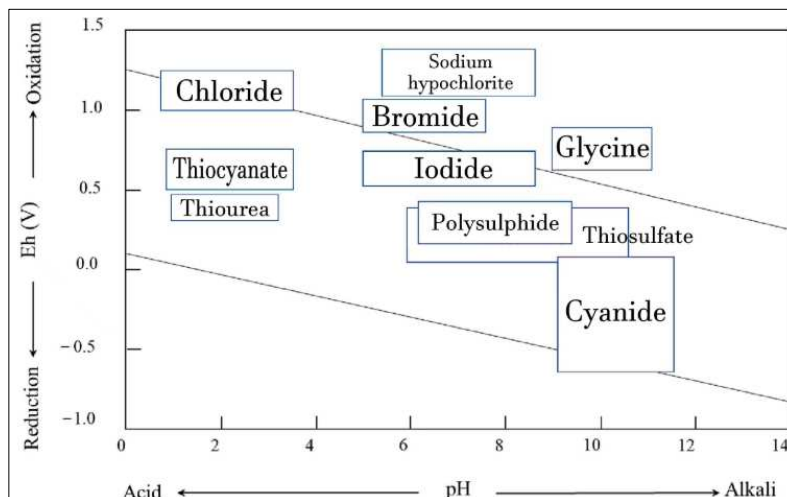
Abstract

The global gold mining industry faces significant environmental challenges due to the extensive use of cyanide, particularly in the extraction of refractory gold ores. This study aims to evaluate the glycine ligand ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) as an environmentally friendly (biodegradable and non-toxic) alternative through the optimization of leaching kinetic parameters. A literature review approach was employed by analyzing 26 relevant scientific articles from reputable databases. Synthesis of the results indicates that the dissolution rate of pure glycine is inherently slow at ambient temperatures. However, the addition of strong oxidizing agents (such as potassium permanganate) and an increase in operating temperature to 60°C can significantly overcome the activation energy barriers. Specifically, the integration of a synergistic thiosulfate-glycine hybrid system has been proven to achieve a gold recovery of 93.7% within 12 hours at 40°C . The effectiveness of the glycine system can be absolutely catalyzed through precise temperature and oxidant management, making it a sustainable, efficient, and eco-friendly extraction alternative for the green metallurgy transition.

Keywords: glycine, gold, leaching, refractory.

PENDAHULUAN

Industri pertambangan emas secara global memegang peranan vital dalam stabilitas ekonomi dan kemajuan teknologi material modern. Seiring dengan meningkatnya permintaan pasar, efisiensi dalam proses ekstraksi emas menjadi prioritas utama bagi setiap perusahaan pertambangan di seluruh dunia. Selama lebih dari satu abad, metode pelindian menggunakan sianida (NaCN) telah mendominasi industri karena kemampuannya dalam melarutkan emas dengan biaya operasional yang relatif ekonomis (Mehrotra & Carbonnier, 2021). Namun, penggunaan sianida dalam skala besar membawa konsekuensi ekologis yang sangat serius akibat sifat toksisitasnya yang tinggi terhadap makhluk hidup dan lingkungan. Masalah utama muncul ketika terjadi kebocoran pada bendungan *tailing* yang dapat menyebabkan kontaminasi zat sianida pada aliran air permukaan dan air tanah secara permanen.



Gambar 1. Tingkat Keasaman untuk tiap pelindi (Wang, et al., 2025)

Regulasi lingkungan yang semakin ketat di Indonesia akan memaksa industri untuk mulai mengevaluasi kembali penggunaan bahan kimia berbahaya karena kandungan asam yang tinggi dalam operasional mereka. Oleh karena itu, transisi menuju teknologi hidrometalurgi yang lebih ramah lingkungan bukan lagi sekadar pilihan, tetapi sebuah kebutuhan mendesak bagi keberlanjutan industri pertambangan nasional. Pemanfaatan ligan alternatif yang efektif dan aman bagi ekosistem telah menjadi fokus utama penelitian metalurgi pada dekade ini (Mbayo et al., 2019).

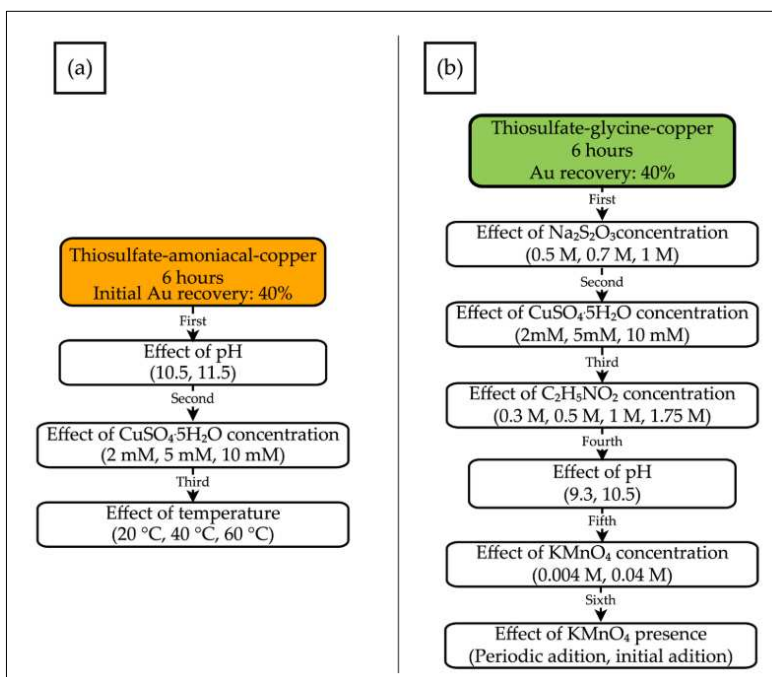
Tantangan teknis dalam ekstraksi emas semakin kompleks ketika industri dihadapkan pada bijih emas tipe refraktori yang struktur mineraloginya sulit untuk di tembus (Marsden & House, 2006). Bijih refraktori sering kali mengandung mineral pengganggu (*gangue*) seperti pirit atau arsenopirit yang menghalangi kontak langsung antara ligan pelindi dengan butiran emas murni. Pada kondisi ini, penggunaan asam amino khususnya glisin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) muncul sebagai kandidat ligan alternatif yang sangat menjanjikan karena sifatnya yang stabil dan nontoksik. Glisin menawarkan keunggulan berupa selektivitas yang baik terhadap emas dan mampu bekerja efektif pada bijih yang mengandung kadar tembaga tinggi (Oraby & Eksteen, 2014). Selain keamanannya, glisin juga bersifat *biodegradable* sehingga limbah hasil pengolahannya tidak memberikan beban polutan yang berat bagi lingkungan sekitar tambang. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa efisiensi disolusi emas dalam sistem glisin dapat bersaing dengan sistem ligan nonsianida lainnya seperti tiosulfat atau klorinasi yang cenderung memiliki stabilitas reagen rendah (Perea & Restrepo, 2018). Meskipun demikian, mekanisme kinetika pelindian menggunakan glisin masih memerlukan penelitian yang lebih mendalam supaya dapat diaplikasikan secara optimal pada skala industri. Kecepatan reaksi dalam sistem ini sangat dipengaruhi oleh variabel konsentrasi ligan, jenis oksidator, dan temperatur operasi yang digunakan selama proses berlangsung.

Implementasi metalurgi hijau dalam industri emas Indonesia kini memiliki urgensi yang sangat mendesak guna menyelaraskan proses ekstraksi mineral dengan target *Nationally Determined Contributions* (NDCs) 2060 melalui transisi menuju ekonomi rendah karbon (Wijayanto et al., 2025). Optimalisasi proses ekstraksi yang efisien tanpa merusak lingkungan menjadi kunci utama bagi perusahaan untuk mendapatkan izin beroperasi dari masyarakat lokal. Namun, data mengenai kinetika pelindian emas refraktori menggunakan glisin pada karakteristik bijih lokal di Indonesia masih sangat terbatas dalam literatur ilmiah saat ini (Norgate & Haque, 2025). Beberapa studi terdahulu menyebutkan bahwa tantangan utama glisin adalah laju disolusi yang cenderung lebih lambat dibandingkan sianida jika parameter operasinya tidak dikontrol dengan presisi (Johnson, 2015). Hal ini menciptakan celah penelitian (*research gap*) mengenai bagaimana mengoptimalkan parameter kinetika supaya durasi pelindian dapat dipersingkat tanpa mengurangi persen *recovery* emas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis mendalam mengenai pengaruh suhu dan konsentrasi oksidan terhadap laju pelindian emas menggunakan ligan glisin. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah serta rekomendasi teknis bagi pengembangan metode ekstraksi emas yang lebih berkelanjutan dan efisien di masa depan.

METODOLOGI

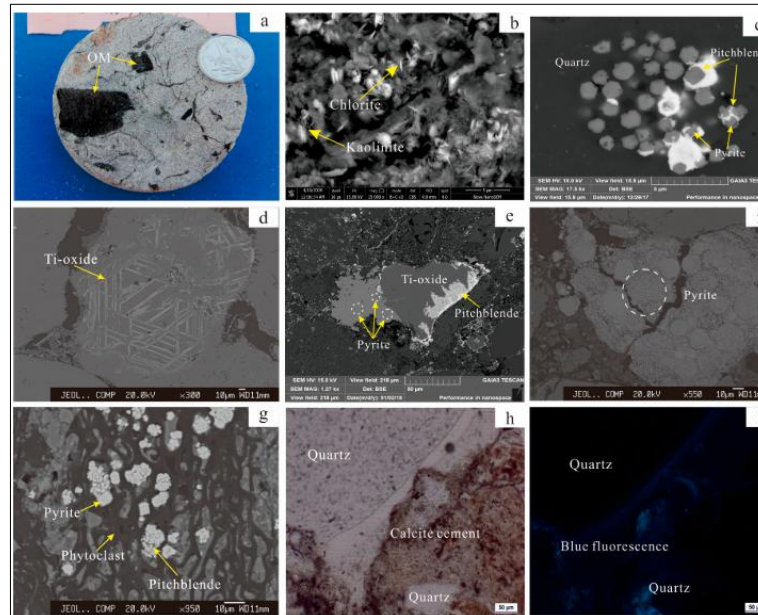
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan studi literatur yang melibatkan analisis data dari berbagai pengujian metalurgi fisik dan kimia. Pencarian artikel ilmiah dilakukan melalui pangkalan data Scopus, ScienceDirect, ResearchGate, dan Elsevier dengan kata kunci *glycine*, *gold*, *leaching*,

refractory. Melalui proses pencarian tersebut, ditemukan total temuan sebanyak 438 artikel. Dari total tersebut, dilakukan proses seleksi menggunakan kriteria inklusi (artikel yang fokus pada optimasi pelindian emas refraktori dan penggunaan ligan glisin) serta kriteria eksklusi (artikel yang tidak relevan dengan sistem ligan hibrida atau diterbitkan di luar rentang waktu yang ditentukan), sehingga didapatkan jumlah artikel akhir yang relevan untuk dianalisis adalah berjumlah 21 artikel. Artikel tersebut menjadi referensi bagi penulis dalam menyusun hasil studi literatur ini yang ditandai dengan adanya sitasi pada kalimat tertentu. Adapun tujuan fundamental dari metodologi ini adalah untuk mereduksi hambatan kinetik yang terdapat pada bijih emas refraktori dan menemukan parameter optimum pelindian menggunakan sistem ligan hibrida berbasis glisin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$). Penelitian ini akan terbagi dalam dua fase utama, yaitu fase pengolahan oksidatif dan fase pelindian agitasi (Tapfuma et al., 2024). Penelitian ini juga menggunakan statistik berbasis *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain eksperimental *Central Composite Design* (CCD). Desain ini secara khusus dipilih karena kemampuannya yang presisi dalam memetakan interaksi orde kedua (kuadratik) maupun efek silang di antara berbagai parameter kritis, seperti rentang temperatur (20°C - 60°C), konsentrasi molar ligan glisin ($0,3\text{ M}$ - $3,0\text{ M}$), fluktuasi derajat keasaman (pH $9,3$ - 12), serta gradasi dosis agen oksidator (Redrovan et al., 2025).



Gambar 2. Perbandingan antara metodologi ammonia tiosulfat (a) dan tiosulfat sistem glisin (b) (Redrovan et al., 2025)

Melalui pemodelan matematis ini, probabilitas tercapainya titik ekuilibrium kinetika dengan tingkat perolehan (*recovery*) emas maksimum dapat diekstrapolasi dengan tingkat signifikansi statistik sebesar 95% (Norgate & Haque, 2025). Proses preparasi mekanis diawali dengan homogenisasi sampel menggunakan metode statistik *Cone and Quartering* yang dilanjutkan dengan reduksi linier menggunakan perangkat *riffle splitter* dan *rotary splitter*. Prosedur ini diimplementasikan untuk mengekstrak bijih dengan massa 400 gram per sampel uji. Material mentah tersebut kemudian dilakukan kominusi sampai dengan ukuran partikel P80. Reduksi partikel ini juga dilakukan untuk memperluas area permukaan spesifik (*specific surface area*) bagi reagen pelindi. Penentuan kadar emas awal (*head grade*) akan dilakukan dengan menggunakan metode kalsinasi *Fire Assay* dengan konsentrasi absolut emas sebesar 10 g/t (gram per ton) pada salah satu varian sampel primer (Li et al., 2022). Pengujian difraksi sinar-X (*X-Ray Diffraction*) juga dilakukan secara kuantitatif untuk melihat konfigurasi struktur *gangue* yang berpotensi memicu efek pasivasi selama tahap pelindian murni.



Gambar 3. Uji SEM untuk bijih refraktori emas (a-i) (Liu et al., 2024)

Selain itu, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) juga akan dilakukan untuk mendeteksi inklusi mikro yang biasanya terdapat pada bijih emas refraktori (Liu et al., 2024). Bijih refraktori yang akan dilakukan pelindian dengan mineral sulfida harus melalui tahap pengolahan oksidatif terlebih dahulu. Pada kondisi ini, pelindian langsung menggunakan glisin akan berakhir pada tingkat kelarutan yang sangat rendah. Oleh karena itu, penelitian ini akan membandingkan dua mekanisme pengolahan oksidatif paralel untuk dievaluasi nilai efisiensinya. Metodologi pertama dan yang paling difokuskan adalah oksidasi reaktif kimia basah menggunakan agen pengoksidasi kuat Kalium Permanganat (KMnO_4). Dalam prosedur ini, batuan bijih direndam dan diagitasi di dalam larutan yang mengandung 2 g/L KMnO_4 selama 24 jam. Tingkat keasaman reaktor diatur secara presisi pada konfigurasi pH 5 dengan potensial reduksi oksidasi (redoks) stabil di ambang 110 mV. Secara termodinamika, kondisi spesifik ini menginduksi reduksi anion permanganat (MnO_4^-) menjadi endapan mangan dioksida (MnO_2). Reaksi redoks spontan ini membuat struktur pasif gipsium mampu menangkap butiran emas. Pengukuran spektroskopi UV-Vis mengonfirmasi kemunculan panjang gelombang 280 nm yang menjadi penanda absolut teroksidasinya emas menjadi fasa Au(I) secara parsial di tahap awal ini (Q. Li et al., 2017). Pada metodologi kedua, penelitian akan menggunakan mekanisme pirometalurgi, yakni dengan memanaskan sampel di dalam *muffle furnace*. Proses pemanasan dalam *furnace* tersebut harus disertai juga dengan adanya ventilasi udara konstan pada temperatur kalibrasi 650 °C selama 120 menit. Ambang batas termal ini sangat kritikal karena pemanasan sendiri bertujuan untuk menghanguskan residu karbon aktif dan membuka makropori batuan (Wang et al., 2025). Pemilihan temperatur ini juga ditujukan secara khusus untuk menghindari fenomena *sintering* termal yang dapat memicu terbentuknya kalsium silikat (CaSiO_3) dan dapat membuat ukuran jaringan pori kembali menyusut atau mengecil (H. Li et al., 2022).

Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode pengumpulan data arsip berupa studi literatur yang melibatkan pencarian dan ekstraksi data sekunder dari berbagai artikel pengujian metalurgi fisik dan kimia. Data dikumpulkan melalui penelusuran komprehensif pada pangkalan data ilmiah terkemuka, yakni Scopus, ScienceDirect, ResearchGate, dan Elsevier. Proses pencarian menggunakan kombinasi kata kunci spesifik: *glycine*, *gold*, *leaching*, dan *refractory*. Dari populasi awal berupa 438 temuan artikel literatur, sampel diekstraksi menggunakan metode *purposive sampling* berdasarkan kriteria seleksi yang ketat. Kriteria inklusi difokuskan pada artikel mengenai optimasi pelindian emas refraktori menggunakan ligan glisin, sementara kriteria eksklusi mengeleminasi artikel dengan sistem ligan hibrida yang tidak relevan serta batasan rentang waktu penerbitan. Melalui penyaringan ini, diperoleh sampel akhir sebanyak 21 artikel ilmiah yang relevan untuk dikaji secara mendalam.

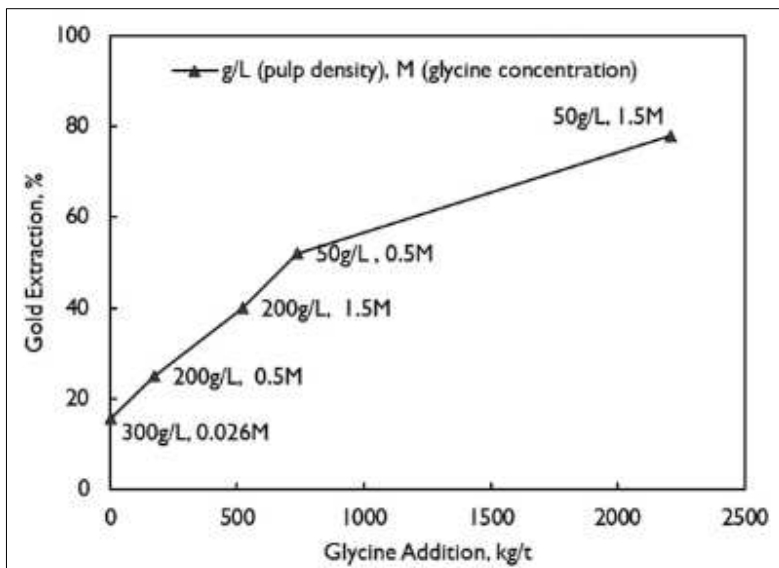
Metode Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis kuantitatif dan pemodelan matematis untuk mengoptimalkan parameter kinetika pelindian. Analisis statistik kuantitatif dilakukan menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan pendekatan eksperimental *Central*

Composite Design (CCD). Metode analisis ini dipilih karena kemampuannya yang presisi dalam memetakan interaksi orde kedua (kuadratik) dan efek silang dari parameter termodinamika kritis, seperti rentang suhu (20°C–60°C), konsentrasi molar ligan (0,3 M–3,0 M), fluktuasi pH (9,3–12), dan dosis agen oksidator. Selain itu, data mineralogi dievaluasi secara kuantitatif melalui hasil pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengidentifikasi efek pasivasi dan inklusi mikro pada bijih refraktori. Selanjutnya, analisis laju disolusi dievaluasi menggunakan pemodelan teoretis *Shrinking Core Model* (SCM) untuk mengonfirmasi bahwa mekanisme reaksi didominasi oleh kontrol reaksi kimia (*Chemical Reaction Control*) pada antarmuka mineral.

HASIL DAN PEMBAHASAN

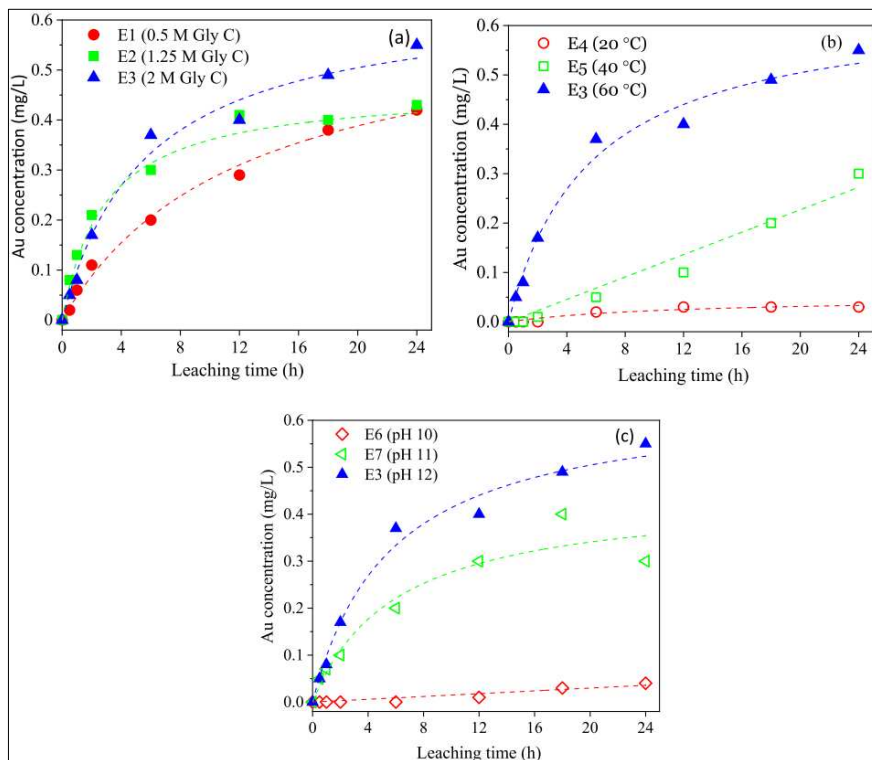
Transisi dari sistem sianidasi menuju ligan organik seperti glisin merupakan strategi yang dikenal efektif untuk menekan dampak toksisitas lingkungan. Meskipun sianida menawarkan biaya operasional yang ekonomis, risiko kontaminasi permanen pada air tanah akibat kebocoran bendungan *tailing* menjadi alasan kuat bagi industri untuk mengevaluasi ligan alternatif. Namun, tantangan utama yang ditemukan dalam penelitian ini adalah laju disolusi glisin murni yang secara inheren jauh lebih lambat dibandingkan sianida. Hal ini selaras dengan temuan Oraby, dkk (2020) yang menyatakan bahwa pelindian glisin aerasi pada temperatur ruang memerlukan waktu hingga 336 jam untuk mencapai pemulihan 85%, sehingga aplikasi industri tanpa modifikasi kinetika dianggap tidak layak secara ekonomi (Oraby et al., 2020). Untuk mengatasi kelambanan kinetika tersebut, penggunaan oksidator kuat seperti Kalium Permanganat (KMnO_4) terbukti memberikan dampak revolusioner. Berbeda dengan pelindian konvensional yang hanya mengandalkan aerasi oksigen (8–10 ppm), penambahan KMnO_4 memungkinkan ekstraksi emas mencapai 85,1% pada suhu ambien dalam waktu 48 jam. Temuan ini diperkuat oleh Tapfuma dkk. (2024) yang mendemonstrasikan bahwa *pre-treatment* permanganat selama 24 jam yang diikuti oleh pelindian glisin 1,5 M dapat menghasilkan pemulihan emas hingga 91,4% (Tapfuma et al., 2024).



Gambar 4. Perolehan ekstraksi bijih emas refraktori menggunakan glisin (Tapfuma et al., 2024)

Keunggulan permanganat dibandingkan oksidator lain seperti hidrogen peroksida (H_2O_2) terletak pada kemampuannya untuk mendegradasi material organik dan sulfida secara lebih stabil pada pH basa, sekaligus menghasilkan produk sampingan berupa mangan dioksida (MnO_2) yang bersifat nontoksik.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan temperatur merupakan parameter paling signifikan dalam mendobrak hambatan energi aktivasi pada bijih refraktori. Altinkaya dkk. (2020) melaporkan bahwa peningkatan suhu dari 23°C 60°C pada sistem glisin dapat meningkatkan pemulihan emas dari titik minimal menuju 90% dalam 24 jam (Altinkaya et al., 2020).



Gambar 5. Efek konsentrasi glisin (a), temperatur (b), dan pH pada disolusi emas (c) (Altinkaya et al., 2020)

Secara teoretis, data kinetika penelitian ini sesuai dengan *Shrinking Core Model* (SCM) yang menunjukkan kontrol laju reaksi didominasi oleh mekanisme reaksi kimia pada antarmuka mineral (*Chemical Reaction Control*). Hal ini bertolak belakang dengan sistem tiosulfat murni yang sering kali terkendali oleh difusi lapisan film cair. Dalam studi lokal di Indonesia oleh Mutimutema (2022), didapatkan bahwa pelindian bijih emas menggunakan sistem glisin H_2O_2 pada suhu 60°C dapat meningkatkan proses ekstraksi sebesar 84% dalam 12 jam. Hal ini juga membuktikan bahwa panas eksternal diperlukan untuk mengatasi pasivasi permukaan mineral (Mutimutema et al., 2022). Lebih lanjut, komparasi dari berbagai jenis agen pengoksidasi dalam sistem pelindian glisin telah divalidasi oleh serangkaian studi kinetika terbaru. Penambahan agen pengoksidasi tidak hanya mempercepat kinetika reaksi, tetapi juga menentukan kestabilan kompleks emas-glisinat pada rentang waktu residensial tertentu. Tabel 1 merangkum data komparatif performa disolusi emas menggunakan sistem glisin dengan variasi oksidator berdasarkan pengujian empiris terkini.

Tabel 1. Komparasi Oksidator Disolusi Emas (Hou et al., 2023)

No.	Jenis Oksidator	Suhu Operasi ($^\circ\text{C}$)	Waktu Residensial (Jam)	Perolehan Emas (%)
1.	Hidrogen Peroksida (H_2O_2)	50	24	86,5
2.	Campuran Sianida Rendah	40	48	88,4
3.	Tiosulfat-Glisin Sinergis	40	12	93,7

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa meskipun hidrogen peroksida (H_2O_2) mampu memberikan perolehan ekstraksi yang cukup baik (86,5%), pengaplikasian temperatur yang lebih tinggi (50°C) mutlak diperlukan untuk mencegah dekomposisi peroksida prematur yang dapat menghambat oksidasi (Hou et al., 2023). Sebagai rute transisi, penggunaan sistem campuran glisin dan sianida dalam konsentrasi sangat rendah (*starved cyanide system*) menunjukkan efektivitas yang menjanjikan dalam meminimalisir toksisitas sekaligus menjaga efisiensi pelindian di angka 88,4% (Q. Li et al., 2026). Namun, efisiensi kinetika paling superior ditunjukkan oleh penggabungan sistem tiosulfat dan glisin secara sinergis, di mana ligan glisin berperan kuat dalam menstabilkan lingkungan reaksi sehingga perolehan emas mampu menyentuh 93,7% hanya dalam waktu 12 jam pada suhu moderat 40°C (Rezaee et al., 2023). Komparasi data ini menegaskan bahwa pemilihan agen sekunder sangat krusial dalam mempercepat laju pelindian asam amino.

Integrasi glisin ke dalam sistem tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) dan katalis tembaga (Cu^{2+}) merupakan puncak inovasi dalam penelitian ini. Meskipun tiosulfat dikenal memiliki laju ekstraksi yang cepat, ketidakstabilan reagen akibat oksidasi oleh tembaga amoniakal sering kali menjadi penghalang industri. Namun, dalam penelitian Azizithorgabeh (2022), didapatkan bahwa glisin berperan kritis sebagai agen penstabil yang membentuk kompleks tembaga-glisinat, mencegah degradasi tiosulfat menjadi politionat tak berguna. Hasil sintesis data menunjukkan bahwa sistem hibrida ini mampu memperoleh recovery sebesar 89,3% hanya dalam waktu 6 jam, sebuah pencapaian yang setara dengan efisiensi sianidasi (89,8%) namun dengan durasi empat kali lebih singkat (Azizithorgabeh et al., 2021). Pendapat ini didukung oleh Wang (2025) melalui pemodelan termodinamika yang menyatakan bahwa kehadiran glisin memperluas rentang pH operasional hingga pH 9,3, di mana sistem tetap stabil tanpa perlu penambahan amonia.

KESIMPULAN

Efektivitas kinetika pelindian emas refraktori menggunakan ligan glisin dapat dikatalisis secara absolut melalui pengendalian gradien temperatur dan manajemen dosis agen pengoksidasi yang presisi. Integrasi suhu operasi pada titik optimum 60°C bersama reagen permanganat mereduksi durasi pelindian yang selama ini menjadi limitasi metode asam amino, sekaligus mengoptimalkan laju difusi ligan menuju mikropori tanpa memicu fenomena kerusakan reagen. Konfigurasi operasional ini membuktikan bahwa sistem berbasis glisin tidak hanya valid sebagai kompensasi terhadap defisit ekologis metode konvensional bersianida, namun juga terbukti unggul secara teknis sebagai metode ekstraksi yang berkelanjutan dan efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

[Bagian ucapan terima kasih disembunyikan sementara untuk keperluan tinjauan sejawat buta (blind review).]

DAFTAR PUSTAKA

- Altinkaya, P., Wang, Z., Korolev, I., Hamuyuni, J., Haapalainen, M., Kolehmainen, E., Yliniemi, K., & Lundström, M. (2020). Leaching and recovery of gold from ore in cyanide-free glycine media. *Minerals Engineering*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106610>
- Azizithorgabeh, A., Mahandra, H., Ramsay, J., & Ghahreman, A. (2021). Gold Leaching from an Oxide Ore Using Thiocyanate as a Lixiviant: Process Optimization and Kinetics. *ACS Omega*, 6(27), 17183–17193. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00525>
- Hou, L., López Valdivieso, A., Chen, P., Zhang, G., Zhang, Q., Chen, Y., Song, S., & Jia, F. (2023). An electrochemical study of the dissolution behavior of gold in a novel glycine-thiosulfate system. *Minerals Engineering*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108273>
- Johnson, C. A. (2015). The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. In *Applied Geochemistry* (Vol. 57, pp. 194–205). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.05.023>
- Li, H., Li, Z., Jin, J., Han, Y., & Li, Y. (2022). Pore Evolution in Refractory Gold Ore Formed by Oxidation Roasting and the Effect on the Cyanide Leaching Process. *ACS Omega*, 7(4), 3618–3625. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06248>
- Li, Q., Zhang, Y., Liu, X., Xu, B., Yang, Y., & Jiang, T. (2017). Improvement of gold leaching from a refractory gold concentrate calcine by separate pretreatment of coarse and fine size fractions. *Minerals*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/min7050080>
- Li, Q., Zhu, Y., Zhang, Y., Liu, X., Qiao, S., Yang, Y., & Jiang, T. (2026). Thiosulfate leaching of gold: An review on novel catalytic systems. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 36(4), 1294–1319. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(25\)67032-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(25)67032-4)
- Liu, J., Qin, M., Huang, S., Liu, Z., & Zhang, L. (2024). Mineralogical and Geochemical Evidence for the Origin of the DL Uranium Deposit in the Songliao Basin, Northeast China. *Minerals*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/min14020149>

- Marsden, John., & House, C. Iain. (2006). *Chemistry of Gold Extraction* (Robert. S. Shoemaker, Ed.; I. House, Tran.; 2nd Edition, Vol. 2). SME.
- Mbayo, J. J. K., Simonsen, H., & Ndlovu, S. (2019). Improving the gold leaching process of refractory ores using the Jetleach reactor. *Minerals Engineering*, 134, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.003>
- Mehrotra, R., & Carbonnier, G. (2021). Abnormal pricing in international commodity trade: Empirical evidence from Switzerland. *Resources Policy*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102352>
- Mutimutema, P., Akdogan, G., & Tadie, M. (2022). Evaluation of pre-treatment methods for gold recovery from refractory calcine tailings. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122. <https://doi.org/10.17159/2411>
- Norgate, T., & Haque, N. (2025). Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production. *Journal of Cleaner Production*, 29–30, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.042>
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2014). The selective leaching of copper from a gold-copper concentrate in glycine solutions. *Hydrometallurgy*, 150, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.09.005>
- Oraby, E. A., Eksteen, J. J., & O'Connor, G. M. (2020). Gold leaching from oxide ores in alkaline glycine solutions in the presence of permanganate. *Hydrometallurgy*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105527>
- Perea, C. G., & Restrepo, O. J. (2018). Use of amino acids for gold dissolution. *Hydrometallurgy*, 177, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.03.002>
- Redrovan, A. S., Torre, E. de la, & Aragón-Tobar, C. F. (2025). Gold Leaching from an Auriferous Ore by Alkaline Thiosulfate–Glycine–Copper Solution. *Metals*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/met15020204>
- Rezaee, M., Saneie, R., Mohammadzadeh, A., Abdollahi, H., Kordloo, M., Rezaee, A., & Vahidi, E. (2023). Eco-friendly recovery of base and precious metals from waste printed circuit boards by step-wise glycine leaching: Process optimization, kinetics modeling, and comparative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136016>
- Tapfuma, by A., Akdogan, G., Tadie, M., & Tapfuma, A. (2024). Investigation of glycine leaching for gold extraction from Witwatersrand gold mine tailings with permanganate pre-treatment Correspondence to: Dates: How to cite. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 124(4), 219–230. <https://doi.org/10.17159/2411>
- Wang, S., Wu, J., & Jiao, F. (2025). Pretreatment and Extraction of Gold from Refractory Gold Ore in Acidic Conditions. In *Minerals* (Vol. 15, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/min15040340>
- Wijayanto, T., Hakam, D. F., & Kemala, P. N. (2025). Vision for Indonesia's 2050 power generation: Scenarios of hydrogen integration, nuclear energy prospects, and coal phase-out impact. *Sustainable Futures*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100438>