

## JENIS REAKSI KIMIA DALAM PROSES EKSTRAKSI EMAS DAN IMPLIKASI TERHADAP EFISIENSI TAMBANG: STUDI LITERATUR

Oleh:

**Muhammad Ali Ilyas**

Prodi Teknik Pertambangan, Universitas Pendidikan Mandalika Mataram  
ilyasmyung@gmail.com

**Abstrak:** Reaksi kimia mewakili proses yang terjadi jika suatu materi mengalami perubahan. Perubahan ini diikuti oleh perubahan struktur molekul serta disertai pelepasan atau penyerapan energi. Dalam dunia ekstraksi emas, dikenal beberapa reaksi kimia dalam proses pelindian (*leaching*), dengan tahap yang dimulai dari penghancuran bijih, dilanjutkan dengan melarutkan emas dengan senyawa kimia, kemudian memisahkan emas dari larutan hingga pemurnian. Dalam artikel ini penulis mengidentifikasi dan mengklasifikasikan berbagai jenis reaksi utama dalam proses penambangan dan pemurnian emas. Ada 4 jenis reaksi kimia yang menjadi fokus utama dalam artikel ini yaitu reaksi dengan sianida, tiosulfat, tiourea dan bioleaching. Dengan menggunakan studi literatur terkini, disajikan analisis komparatif efisiensi reaksi, kinetika dan dampak lingkungannya. Reaksi dengan sianida adalah reaksi yang masih dominan karena efisiensinya, akan tetapi memiliki dampak lingkungan terkait dengan toksisitasnya, sedangkan metode lainnya memperlihatkan prospek yang lebih berkelanjutan.

**Kata kunci:** reaksi kimia, ekstraksi emas, pelindian, sianidasi, tiosulfat dan tiourea, *bioleaching*.

### PENDAHULUAN

Emas merupakan logam yang bernilai tinggi sehingga digunakan secara luas, mulai dari perhiasan hingga diaplikasikan pada elektronik presisi tinggi. Hal ini disebabkan karena emas memiliki sifat kimia yang stabil serta bersifat konduktor yang sangat baik. Untuk memperoleh logam emas tidaklah mudah, sebab emas tersebar dalam matriks bebatuan sebagai butiran halus sehingga diperlukan proses pelindian kimia untuk mengekstraknya secara efektif (Marsden & House, 2006).

Sianidasi merupakan salah satu metode pelindian yang paling banyak digunakan selama lebih dari satu abad. Prinsipnya adalah pembentukan kompleks  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  yang larut dalam air yang diperoleh dari larutan natrium sianida dalam kondisi basa serta memanfaatkan oksigen sebagai oksidator. Karena efektivitasnya yang tinggi menjadikan metode ini sebagai pilihan utama dalam industri. Akan tetapi metode ini memiliki dampak negative terhadap lingkungan, mengingat sianida memiliki sifat dengan toksisitas tinggi dan berpotensi mencemari air tanah dan ekosistem sekitar lokasi tambang (Aylmore, 2005; Mudder, Botz, & Smith, 2001).

Mengingat dampak sianida terhadap lingkungan dan seiring meningkatnya kesadaran akan resiko ekologis, maka para peneliti mulai mencari alternatif metode ekstraksi yang lebih ramah lingkungan. Beberapa alternatif metode ekstraksi yang mulai dikembangkan adalah penggunaan tiosulfat dan tiourea sebagai pelarut emas. Kedua metode pelindian ini lebih aman dibandingkan dengan penggunaan sianida, meskipun masih terdapat kendala dari sisi kestabilan dan efisiensi dalam prakteknya (Ubaldini et al., 2018). Selain itu ada juga pendekatan yang perlu dipertimbangkan, yaitu pendekatan bioleaching. Bioleaching merupakan proses biologis yang

memanfaatkan mikroorganisme seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Pendekatan ini menjadi topik yang semakin relevan karena dapat mengurangi dampak terhadap lingkungan serta pengembangan teknologi tambang hijau (Rawlings, Dew, & Plumb, 2003).

Selain jenis reagen yang digunakan, kondisi operasional dan karakteristik mineralogi bijih juga sangat mempengaruhi keberhasilan proses pelindian. Misalnya pada bijih yang mengandung mineral sulfida seperti pirit atau arsenopirit sering kali menunjukkan ketahanan terhadap pelindian, sehingga diperlukan perlakuan awal seperti oksidasi tekanan atau pemanggangan untuk membuka struktur kristalnya (Fleming, 1992; Parga et al., 2007). Oleh karena itu, pemahaman tentang mekanisme reaksi kimia dalam pelindian emas menjadi kunci dalam penhambatan proses ekstraksi yang lebih efisien.

Berdasarkan latar belakang di atas, peneliti mencoba fokus pada identifikasi dan Analisa jenis-jenis reaksi kimia yang terlibat dalam ekstraksi emas baik yang menggunakan sianida maupun alternatif lainnya. Penelitian ini menggunakan pendekatan telaah literatur guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perkembangan teknologi pelindian dalam ekstraksi emas dan implikasinya terhadap efisiensi serta keberlanjutan tambang emas.

### METODOLOGI

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur sistematis yang bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis dan mengklasifikasikan jenis-jenis reaksi kimia yang terlibat dalam proses ekstraksi emas. Kajian ini mencakup metode

pelindian konvensional yang berbasis sianida maupun pendekatan alternatif non-sianida, termasuk pelindian menggunakan tiosulfat, tiourea, dan bioleaching. Peneliti mengkaji dan memperoleh data dari publikasi ilmiah bereputasi yang terbit dalam dua dekade terakhir, termasuk artikel jurnal, prosiding konferensi, serta buku acuan yang relevan di bidang kimia anorganik terapan dan metalurgi ekstraktif. Data yang diperoleh berasal dari basis data yang mencakup ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, dan Google Scholar, dengan kata kunci pencarian seperti *gold leaching reactions*, *cyanidation chemistry*, *thiosulfate leaching*, dan *bioleaching of refractory ores*. Berikut tabel daftar artikel ilmiah yang dijadikan acuan dalam penulisan artikel ini.

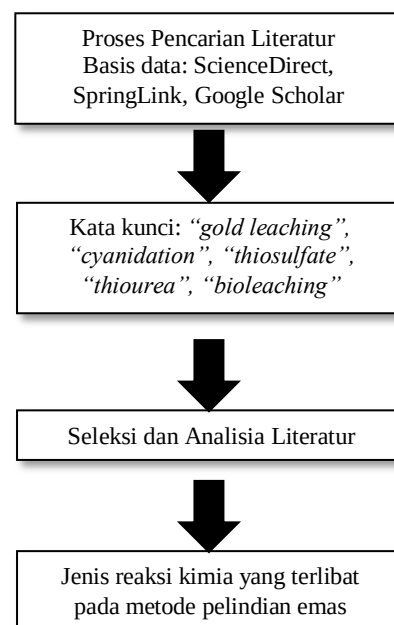
Table 1. Daftar artikel

| N o. | Penulis                                         | Tahun | Negara            | Nama Metode                                 | Tipe Studi               |
|------|-------------------------------------------------|-------|-------------------|---------------------------------------------|--------------------------|
| 1    | Aylmore, M. G.                                  | 2005  | Australia         | Alternative lixiviants (non-cyanide)        | Review / Eksperimental   |
| 2    | Muir, D. M., & Aylmore, M. G.                   | 2004  | Australia         | Thiosulfate leaching                        | Review                   |
| 3    | Zhang, S., & Senanayake, G.                     | 2016  | China / Australia | Acid thiourea leaching                      | Review                   |
| 4    | Rawlings, D. E., Dew, D., & du Plessis, C. A.   | 2003  | Afrika Selatan    | Bio-mineralisasi                            | Review / Eksperimental   |
| 5    | Habashi, F.                                     | 1999  | Kanada            | Hydrometallurgy (umum)                      | Buku Teks / Teoritis     |
| 6    | Marsden, J. O., & House, C. I.                  | 2006  | USA               | Chemistry of gold extraction (Cyanide, dll) | Buku Referensi Teknis    |
| 7    | Rasyid, A., & Suryana, A.                       | 2018  | Indonesia         | Pengolahan emas ramah lingkungan            | Studi Kasus / Terapan    |
| 8    | Mudder, T., Botz, M., & Smith, A.               | 2001  | UK                | Cyanidation waste treatment                 | Buku / Praktek Industri  |
| 9    | Ubal dini, S., et al.                           | 2018  | Italia            | Thiosulfate leaching                        | Eksperimental / Terapan  |
| 10   | Amankwah, R. K., Yen, W. T., & Ramsay, J. O.    | 2010  | Ghana / Kanada    | Bioleaching                                 | Review / Eksperimental   |
| 11   | Fleming, C. A.                                  | 1992  | Afrika Selatan    | Gold extraction chemistry                   | Review Teknis / Teoritis |
| 12   | Parga, J. R., Valenzuela, J. L., & Peterson, E. | 2007  | Meksiko / USA     | Pressure oxidation                          | Eksperimental            |

Dalam penelitian ini, digunakan kriteria inklusi dalam seleksi literatur yang meliputi: (1) publikasi peer-reviewed, (2) memuat uraian reaksi kimia dalam proses ekstraksi emas, dan (3) relevansi langsung dengan proses pelindian emas dari bijih kadar rendah atau refraktori. Sementara itu, artikel dengan informasi yang tidak dapat diverifikasi tanpa deskripsi kimiawi yang jelas tidak dimasukkan ke dalam analisis.

Peneliti kemudian menganalisis data dari sumber yang dipilih untuk mengidentifikasi tipe reaksi dominan yang terlibat. Selain tipe reaksi, parameter-parameter yang mempengaruhi laju dan efisiensi pelindian seperti senyawa kompleks yang terbentuk, serta faktor kinetika dan termodinamika juga dianalisis dalam penelitian ini.

Hasil dari analisis ini disusun dan disajikan dalam bentuk ringkasan table reaksi, diagram mekanisme dan pembahasan naratif yang menekankan kelebihan, keterbatasan, serta potensi pengembangan dari masing-masing jalur reaksi kimia. Peneliti menjaga validitas pendekatan dengan mereferensikan langsung ke publikasi primer dan memastikan sumber berasal dari institusi akademik atau riset yang diakui.

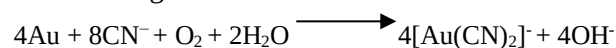


Gambar 1. Bagan alur pencarian literatur

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Reaksi Kimia dalam Pelindian Emas dengan Sianida

Proses yang dominan dalam industri ekstraksi emas adalah metode sianida, karena kemampuannya melarutkan emas dengan efisiensi tinggi dalam kondisi lingkungan yang dapat dikontrol. Reaksinya adalah sebagai berikut:



Dalam reaksi ini oksigen berperan sebagai oksidator yang memungkinkan terbentuknya

kompleks disianaurat (I),  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  yang bersifat sangat larut dalam air. Laju reaksi ditentukan oleh dua faktor, yaitu ketersediaan oksigen terlarut dan konsentrasi sianida. Dalam pelaksanaannya, pH larutan harus tetap dijaga pada kisaran 10,5 – 11 untuk menghindari pelepasan gas HCN yang sangat, beracun dengan menambahkan kapur (CaO) (Marsden & House, 2006).

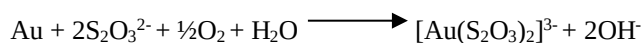
Metode pelindian dengan sianida ini digunakan sebagai standar hidrometalurgi karena efisiensi (melebihi angka 90%) dan selektivitasnya yang tinggi terhadap emas. Akan tetapi, karena toksisitasnya yang tinggi serta berpotensi mencemari ekosistem air dan tanah, maka penerapannya dibatasi melalui regulasi lingkungan yang ketat.

Meskipun memiliki efisiensi yang tinggi, namun proses ini memiliki keterbatasan. Keterbatasannya adalah ketika diterapkan pada bijih refraktori terutama yang mengandung pirit ( $\text{FeS}_2$ ) atau arsenopirit ( $\text{FeAsS}$ ). Hal ini dikarenakan emas terjebak di dalam struktur kristal sulfida tersebut, sehingga diperlukan perlakuan awal seperti roasting, oksidasi tekanan, atau biooksidasi untuk membuka struktur bijih dan memungkinkan reaksi pelindian berlangsung lebih efektif (Fleming, 1992).

#### b. Reaksi Pelindian Non-Sianida: Tiosulfat dan Tiourea

Metode alternatif lain yang banyak diteliti selain sianida adalah tiosulfat ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) dan tiourea ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ). Pelindian dengan metode tiosulfat merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan karena pada metode ini tidak dihasilkan senyawa sianida bebas yang berbahaya bagi lingkungan. Dalam beberapa studi, efisiensinya dapat mencapai hingga 85% tergantung pada komposisi bijih dan kondisi reaksi (Aylmore, 2005). Kestabilan kompleks  $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$  dikatakan rendah terutama terjadi pada saat terjadi fluktuasi pH atau oksidasi tidak terkendali, yang merupakan salah satu kelemahan mendasar dari metode tiosulfat ini. Kestabilan kompleks  $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$  ini perlu mendapat perhatian karena kondisi operasional di lapangan yang cenderung berubah-ubah.

Berikut adalah reaksi pelindian emas dengan metode tiosulfat dalam keberadaan amonia dan tembaga (II) sebagai katalis



Produk reaksi yang terbentuk yaitu kompleks  $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$  memiliki stabilitas sedang dan cukup selektif terhadap emas, akan tetapi pelindian ini sensitif terhadap keberadaan ion logam lain seperti  $\text{Cu}^{2+}$  yang dapat menyebabkan konsumsi tiosulfat yang tinggi. Penurunan efisiensi dan pembentukan endapan sulfur ditimbulkan juga oleh reaksi samping (Jeffrey & Breuer, 2000).

Di sisi lain, metode pelindian berbasis tiourea memperlihatkan hasil pelindian yang cepat dan efisien, terutama pada bijih berkadar tinggi dan dalam

kondisi asam. Senyawa kompleks emas yang mudah larut dapat terbentuk akibat dari afinitas tiourea yang kuat terhadap emas. Namun, reagen ini memiliki stabilitas rendah sehingga mudah terdegradasi secara kimiawi dan biologis, menghasilkan residu organik berbahaya. Penggunaan tiourea bisa menimbulkan beban tambahan dalam pengelolaan limbah cair dan pengendalian lingkungan, dalam konteks tambang rakyat atau skala kecil di Indonesia.

Berikut adalah reaksi utama pelindian menggunakan tiourea ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ):

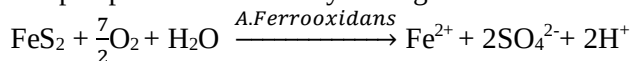


Tiourea dapat berikatan kuat dengan emas, membentuk kompleks stabil. Salah satu kendala pada proses ini adalah dekomposisi kimia tiourea dalam lingkungan asam dan potensi toksisitas residu organik terhadap lingkungan (Ubalini et al., 2018).

#### c. Pendekatan bioleaching

Pada metode ini, aktivitas mikroorganisme dimanfaatkan untuk mengoksidasi mineral sulfida dan membebaskan emas, sehingga metode bioleaching ini menempati posisi yang unik. Bijih refraktori yang sulit ditangani secara kimiawi seperti pirit dan arsenopirit sangat sesuai diproses menggunakan metode ini. Studi oleh Rawlings et al. (2003) menunjukkan bahwa oksidasi  $\text{FeS}_2$  menjadi  $\text{Fe}^{2+}$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  dapat dipercepat secara signifikan oleh *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Emas tidak diluruhkan secara langsung melalui proses ini, melainkan dengan membuka struktur bijih terlebih dahulu sehingga emas dapat diakses oleh pelarut seperti sianida atau tiosulfat.

Adapun persamaan reaksinya sebagai berikut:



Dekomposisi bijih refraktori dapat terbantu akibat dari dihasilkannya kondisi asam dan ion sulfat melalui proses biooksidasi. Metode ini dinilai lebih ramah lingkungan dan ekonomis untuk bijih kadar rendah, meskipun waktu proses yang relatif panjang sehingga menjadi tantangan tersendiri (Rawlings et al., 2003).

#### d. Perbandingan Efisiensi dan Implikasi Lingkungan

Dari studi literatur di atas, dapat dilihat bahwa metode sianida memiliki keunggulan dibandingkan dengan dengan metode lain karena efisiensi (>90%) dan kematangan teknologinya. Akan tetapi, karena memiliki resiko terhadap lingkungan membuatnya berada dalam regulasi yang ketat sehingga membuat banyak negara menerbitkan kebijakan pembatasan penggunaannya. Sementara itu, metode pelindian tiosulfat dan bioleaching memperlihatkan potensi pendekatan yang lebih berkelanjutan, meskipun masih memerlukan beberapa optimasi dalam hal kinetika dan stabilitas produk.

Secara umum, karakter mineralogi bijih, skala produksi, serta pertimbangan lingkungan dan ekonomi jangka panjang sangat menentukan

pemilihan metode pelindian yang digunakan dalam ekstraksi emas. Ke depan, kombinasi antara pemrosesan awal (*pre-treatment*), kondisi reaksi yang dioptimalkan, serta penggunaan reagen yang selektif dan tidak toksik menjadi hal penting dalam pengembangan teknologi ekstraksi.

Table 2. Perbandingan reaksi metode pelindian emas.

| Metode Pelindian | Reagen Utama                                                                                       | Reaksi Kimia Utama                                                                                                                                        | Efisiensi                       | Keunggulan                                           | Keterbatasan                                      |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Sianidasi        | NaCN, O <sub>2</sub>                                                                               | $4\text{Au} + 8\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4[\text{Au}(\text{CN})_2]^- + 4\text{OH}^-$                                     | Sangat tinggi (>90%)            | Teknologi matang, selektivitas tinggi terhadap emas  | Sianida sangat toksik; pembatasan regulasi ketat  |
| Tiosulfat        | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu <sup>2+</sup> , NH <sub>3</sub> | $\text{Au} + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow [\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{2-} + 2\text{OH}^-$ | Sedang-tinggi (70–85%)          | Lebih aman dari sianida; cocok untuk bijih karbonase | Konsumsi reagen tinggi; kompleks tidak stabil     |
| Tiourea          | SC(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> , Fe <sup>3+</sup>                                               | $\text{Au} + 2\text{CS}(\text{NH}_2)_2 + \text{Fe}^{3+} \rightarrow [\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2]^+ + \text{Fe}^{2+}$                           | Tinggi (80–90%)                 | Reaksi cepat; efisien dalam kondisi asam             | Tiourea mudah terdegradasi; residu organik toksik |
| Bioleaching      | Mikroorganisme (A. ferrooxidans)                                                                   | $\text{FeS}_2 + \frac{7}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{A. Ferrooxidans}} \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$         | Tidak langsung (pelapisan emas) | Ramah lingkungan; cocok untuk bijih refraktori       | Proses lambat; perlu kontrol biologis ketat       |

## PENUTUP

Studi dalam artikel ini menyoroti empat metode utama pelindian emas, yakni sianidasi, tiosulfat, tiourea, dan bioleaching, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya. Secara industri, metode sianidasi merupakan metode yang paling efisien (melebihi angka 90%). Akan tetapi karena isu toksisitas menjadikannya masuk dalam regulasi yang ketat sehingga kurang ideal dalam konteks pertambangan berkelanjutan, khususnya di Indonesia. Adapun metode alternatif seperti tiosulfat dan tiourea memiliki potensi yang lebih ramah terhadap lingkungan serta memiliki efisiensi reaksi yang tinggi (mencapai 85%), namun masih terkendala teknis dalam hal kestabilan kompleks dan degradasi kimia. Metode bioleaching meskipun memiliki laju reaksi yang lambat, namun memberikan solusi yang paling ramah lingkungan dibandingkan metode lainnya yang dibahas dalam artikel ini. Selain itu metode bioleaching ini juga dapat diterapkan untuk bijih refraktori yang sulit diolah secara konvensional.

Pemilihan metode pelindian yang tepat perlu mempertimbangkan beberapa hal, seperti karakteristik bijih lokal, biaya operasional, dan regulasi-regulasi terkait lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pelindian yang adaptif, ramah lingkungan, dan terintegrasi secara ekonomi merupakan hal yang dapat dikatakan mendesak dalam industri pertambangan emas di Indonesia. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengeksplorasi kombinasi metode kimia dan biologis, serta optimasi proses berbasis kondisi lokal agar menghasilkan sistem pengolahan emas yang lebih efisien dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aylmore, M. G. (2005). *Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores*. Minerals Engineering, 18(3), 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.014>
- Muir, D. M., & Aylmore, M. G. (2004). *Thiosulfate leaching of gold—A review*. Minerals Engineering, 17(2), 785–801.
- Zhang, S., & Senanayake, G. (2016). *Review of gold leaching in acid thiourea solutions*. Minerals Engineering, 92, 70–84.
- Rawlings, D. E., Dew, D., & du Plessis, C. A. (2003). *Biomineralization of metal-containing ores and concentrates*. Trends in Biotechnology, 21(1), 38–44.
- Habashi, F. (1999). *Textbook of Hydrometallurgy*. Metallurgie Extractive Quebec.
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Rasyid, A., & Suryana, A. (2018). *Pengolahan Emas Skala Kecil yang Ramah Lingkungan: Studi Kasus di Tambang Rakyat Indonesia*. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 14(1), 35–44.
- Mudder, T., Botz, M., & Smith, A. (2001). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*. Mining Journal Books.
- Ubalini, S., Vegliò, F., Toro, L., & Abbruzzese, C. (2018). Processing of gold-bearing ore using tiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5175–5181. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.025>
- Amankwah, R. K., Yen, W. T., & Ramsay, J. O. (2010). Bioleaching of gold: current status and future directions. *Minerals & Metallurgical Processing*, 27(2), 55–60.
- Fleming, C. A. (1992). The chemistry of the extraction of gold. *South African Institute of Mining and Metallurgy Monograph Series*, 7, 284–351.
- Parga, J. R., Valenzuela, J. L., & Peterson, E. (2007). Pressure oxidation pretreatment of refractory gold ore. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 6(4), 15–28.