



Applied Geo-mining and Metallurgy

The Journal of Integrated Applied Geoscience, Mining, and Metallurgy



Analisis Nilai Keekonomian Teknik Peningkatan Oksigen Terlarut Terhadap Ekstraksi Emas dan Perak serta Konsumsi Sodium Sianida

Analysis the Economic Value of Dissolved Oxygen Enhancement Technique for Gold and Silver Extraction and Sodium Cyanide Consumption

Dikri Fajar Ramadhan^{1*}, Imelda Eva Roturena Hutabarat², Denny Lumban Raja³, Sulaeman⁴

^{1,2,3}Prodi Teknologi Metalurgi, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

⁴PT Indo Muro Kencana

* Korespondensi E-mail: dikrifajar@gmail.com

INFO ARTIKEL

Kata Kunci:

Nilai keekonomian, oksigen terlarut, ekstraksi emas, ekstraksi perak, konsumsi NaCN.

ABSTRAK

Proses sianidasi seringkali terbatas oleh konsentrasi oksigen terlarut (DO) dalam air, yang dapat ditingkatkan dengan menggunakan sistem bertekanan. PT Indo Muro Kencana (IMK) telah menerapkan 3 (tiga) strategi peningkatan DO, yaitu teknik injeksi oksigen seperti sparger lance (SPL), peroxide injection (PRI), dan reaktor high shear (RHS), sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses sianidasi mengingat adanya perubahan karakteristik bijih yang diolah sejak tahun 2021. Sejak April 2022, teknik reaktor high shear menjadi metode terbaru yang diimplementasikan oleh PT IMK, menggantikan sparger lance dan injeksi peroksida sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai ekonomis dari ketiga teknik injeksi oksigen dalam proses sianidasi emas dan perak. Uji pelindian dilakukan untuk mengevaluasi seberapa banyak natrium sianida (NaCN) yang digunakan dan seberapa efektif ekstraksi emas dan perak yang terjadi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode reaktor high shear (RHS) menghasilkan tingkat ekstraksi emas dan perak tertinggi, mencapai 97,04% dan 83,83% secara berturut-turut.

Lebih dari itu, teknik RHS juga mengkonsumsi jumlah NaCN yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode lainnya, yakni sekitar 0,84 kg/ton pada waktu tinggal selama 48 jam. Selain itu, pendapatan yang dihasilkan dari ketiga teknik injeksi oksigen tersebut adalah \$275.818,42; \$274.530,16, dan \$285.679,13. Berdasarkan estimasi ini, dapat disimpulkan bahwa metode reaktor high shear (RHS) menjadi pilihan yang paling praktis untuk diimplementasikan dalam proses sianidasi di PT Indo Muro Kencana. Dengan mempertimbangkan efisiensi ekstraksi dan penggunaan reagen yang lebih rendah, implementasi teknik reaktor high shear (RHS) dapat memberikan manfaat signifikan bagi perusahaan, baik dalam hal efisiensi operasional maupun potensi penghematan biaya. Keputusan untuk beralih menggunakan teknik RHS sebagai metode terbaru dalam proses sianidasi menegaskan komitmen PT IMK dalam terus meningkatkan kualitas dan efisiensi dalam aktivitas pengolahan mineral.

ARTICLE INFO

Keywords:

Economic value, dissolved oxygen, gold extraction, silver extraction, NaCN consumption

ABSTRACT

Cyanidation process is often limited by the concentration of dissolved oxygen (DO) in water, which can be enhanced using a pressurized system. PT Indo Muro Kencana (IMK) has implemented 3 (three) DO enhancement strategies, namely oxygen injection techniques such as sparger lance (SPL), peroxide injection (PRI), and high shear reactor (RHS), in an effort to optimize the cyanidation process due to changes in ore characteristics since 2021. Since April 2022, the high shear reactor technique has become the latest method implemented by PT IMK, replacing the previously used sparger lance and peroxide injection. This study aims to analyze the economic value of the three oxygen injection techniques in the gold and silver cyanidation process. Leaching tests were conducted to evaluate the amount of sodium cyanide (NaCN) used and the effectiveness of gold and silver extraction. The test results showed that the high shear reactor

(RHS) method achieved the highest extraction rates for gold and silver, reaching 97.04% and 83.83%, respectively. Moreover, the RHS technique also consumed less NaCN compared to other methods, approximately 0.84 kg/ton during a 48-hour residence time. Additionally, the revenues generated from the three oxygen injection techniques were \$275,818.42, \$274,530.16, and \$285,679.13, respectively. Based on these estimations, it can be concluded that the high shear reactor (RHS) method is the most practical choice to be implemented in the cyanidation process at PT Indo Muro Kencana. Considering the higher extraction efficiency and lower reagent usage, the implementation of the high shear reactor (RHS) technique can provide significant benefits to the company in terms of operational efficiency and cost savings. The decision to switch to the RHS technique as the latest method in the cyanidation process reaffirms PT IMK's commitment to continuously improving the quality and efficiency of mineral processing activities.

1. PENDAHULUAN

Logam emas yang telah banyak digunakan sepanjang sejarah dan tetap menjadi faktor pendorong dalam perkembangan ekonomi hingga zaman sekarang (Huang & Kilic, 2019). Penambangan emas merupakan bisnis internasional yang dilakukan di hampir seluruh daratan kecuali Antartika, yang mengakibatkan penurunan persediaan emas (Ince, 2019). Saat ini, sumber daya tambang emas alami semakin menipis dan bijih berkualitas tinggi secara perlahan habis, dengan bijih emas refraktori menyumbang sekitar sepertiga dari total produksi emas dari bijih alam (Konadu et al., 2019)

Seiring berjalannya waktu, ketersediaan bijih emas dan perak yang hanya membutuhkan satu tahap pelindian semakin berkurang (Aylmore, 2016; Bas et al., 2016). Dalam banyak kasus, kendala tersebut disebabkan oleh adanya fase mineral refraktori yang mengandung logam mulia. Di tempat lain, matriks bijih itu sendiri terdiri dari campuran fase mineral yang heterogen, beberapa di antaranya bersaing dengan emas dan perak dalam proses pelindian. Dalam kasus mineral kompleks atau refraktori, ekstraksi emas dan perak melalui pelindian satu tahap umumnya minim, sehingga memerlukan perlakuan pendahuluan untuk mengubah karakteristik bijih. Metode-

metode *pre-treatment* mineral refraktori yang sangat beragam termasuk dengan asam sulfat atau nitrat, bromida, bioleaching, pelindian bertekanan, dan penggilingan ultrafine (Celep et al., 2018; Snyders et al., 2018).

Saat ini, PT IMK berupaya untuk mengatasi masalah yang terjadi akibat bijih kompleks dengan ditandai tingginya kandungan sulfida, dan juga mempunyai viskositas slurry akibat adanya mineral jenis lempung (*clay*). Sehingga upaya yang dilakukan PT IMK adalah meningkatkan kandungan oksigen terlarut pada proses sianidasi mulai dari teknik *sparger lance*, *peroxide injection* hingga teknologi terbaru yang digunakan PT IMK untuk meningkatkan oksigen terlarut adalah reaktor *high shear* yang diterapkan sejak bulan april 2022.

Bijih kompleks, yang ditandai oleh konsistensinya yang tinggi karena mengandung mineral lempung, memiliki sifat permukaan yang unik yang berkontribusi terhadap daya tarik partikel tertentu di sekitar partikel lempung. Partikel positif ini menciptakan lapisan ionik, yang menghasilkan slurry yang lebih tebal (Bergaya & Lagaly, 2013). Selain itu, kandungan sulfida yang tinggi dapat membentuk lapisan pada permukaan emas. Viskositas yang tinggi, yang merupakan karakteristik slurry yang lebih padat, memberikan resistensi yang signifikan terhadap pengadukan akibat gumpalan partikel yang lebih besar. Akibatnya, partikel padat membentuk penghalang yang

membatasi pelarutan oksigen dalam air. Selain itu, penurunan kadar Oksigen Terlarut (DO) juga dipengaruhi oleh kandungan sulfida yang tinggi, yang mengakibatkan oksidasi zat-zat terlarut (Pratomo, 2014; Soto, 2020).

Mengingat faktor-faktor ini, langkah-langkah proaktif sangat penting. Meningkatkan kandungan DO dalam bijih kompleks menjadi krusial untuk mengurangi konsumsi natrium sianida sekaligus meningkatkan persentase ekstraksi emas dan perak. Dengan mengatasi tantangan ini dan meningkatkan kadar DO, dampak buruk dari viskositas tinggi dan kandungan sulfida dapat diatasi. Pendekatan strategis ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan proses ekstraksi. Karakteristik bijih kompleks, yang ditandai oleh konsistensinya dan sifat permukaannya, memperkenalkan tantangan yang berasal dari viskositas tinggi dan kandungan sulfida. Mengatasi tantangan ini melalui peningkatan kandungan DO menjadi strategi yang bijaksana untuk mengurangi konsumsi sianida dan pada saat yang sama meningkatkan tingkat ekstraksi emas dan perak. Dengan memahami faktor-faktor ini secara komprehensif, operasi pengolahan mineral dapat mengoptimalkan proses mereka, memastikan pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan dan efisien.

Menurut Konadu et al., (2020), keberadaan mineral sulfida di dalam bijih mengurangi laju reaksi sianidasi (sesuai dengan data lapangan)

dengan membentuk lapisan pasif pada permukaan emas (Gui et al., 2023; Konadu et al., 2020). Mineral sulfida seperti pirit, dapat dioksidasi untuk menghasilkan besi-hidroksida (FeOOH), yang kemudian membentuk lapisan pasif pada permukaan emas dan perak, sehingga mencegah emas bersentuhan dengan sianida. Kompleks besi (II) sianida juga dapat dihasilkan ketika pirit bereaksi dengan sianida dan oksigen. Hal ini akan mendorong penggunaan oksigen dan sianida yang tinggi (Guo et al., 2019). Selain itu, terdapat mineral pembentuk perak yang dikenal sebagai argentit dan achantit (Ag_2S) yang pada dasarnya dapat menghambat pelindian emas dan perak jika dalam jumlah besar. Namun, oksigen dapat membantu mengatasi mineral sulfida, karena oksigen dapat mempercepat pelarutan emas dan perak (Anderson, 2016; Wang et al., 2015).

Secara umum, penilaian nilai ekonomi dilaksanakan untuk mengestimasi potensi keuntungan yang dapat diperoleh dari penerapan ketiga teknik, mirip dengan pendekatan yang diambil oleh Lotz dkk. (2015) dalam menganalisis keuntungan sebelum dan setelah penerapan RHS. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai dampak ekonomi dari penggunaan teknik tersebut terhadap hasil yang diperoleh. Ini memfasilitasi perusahaan dalam menentukan teknik yang paling efektif, efisien, dan menguntungkan untuk mengatasi tantangan

dalam penurunan oksigen terlarut dan rekoveri. Dengan memahami implikasi finansial dari setiap teknik, perusahaan dapat mengambil keputusan yang lebih terinformasi dan tepat dalam memilih pendekatan terbaik guna memastikan operasi yang optimal serta hasil yang paling menguntungkan.

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dari ketiga teknik jika dilihat dari hasil ekstraksi dan konsumsi natrium sianida. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah untuk menganalisa nilai keekonomian dari masing-masing teknik yang menghasilkan ekstraksi paling tinggi serta konsumsi sianida yang lebih rendah/efisien.

Melalui penelitian ini, diharapkan mendapat informasi yang berharga mengenai efisiensi dan efektivitas dari teknik SPL, PRI, dan RHS dalam proses pelindian bijih logam. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan kontributif dalam pengembangan dan perbaikan proses pelindian yang lebih efisien dan ramah lingkungan di industri metalurgi. Selain itu, data yang diperoleh dari penelitian ini juga dapat menjadi referensi dan acuan untuk penelitian selanjutnya dalam upaya terus meningkatkan kualitas dan keberlanjutan dari proses pengolahan bijih logam.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium metalurgi PT IMK yang terletak di kompleks

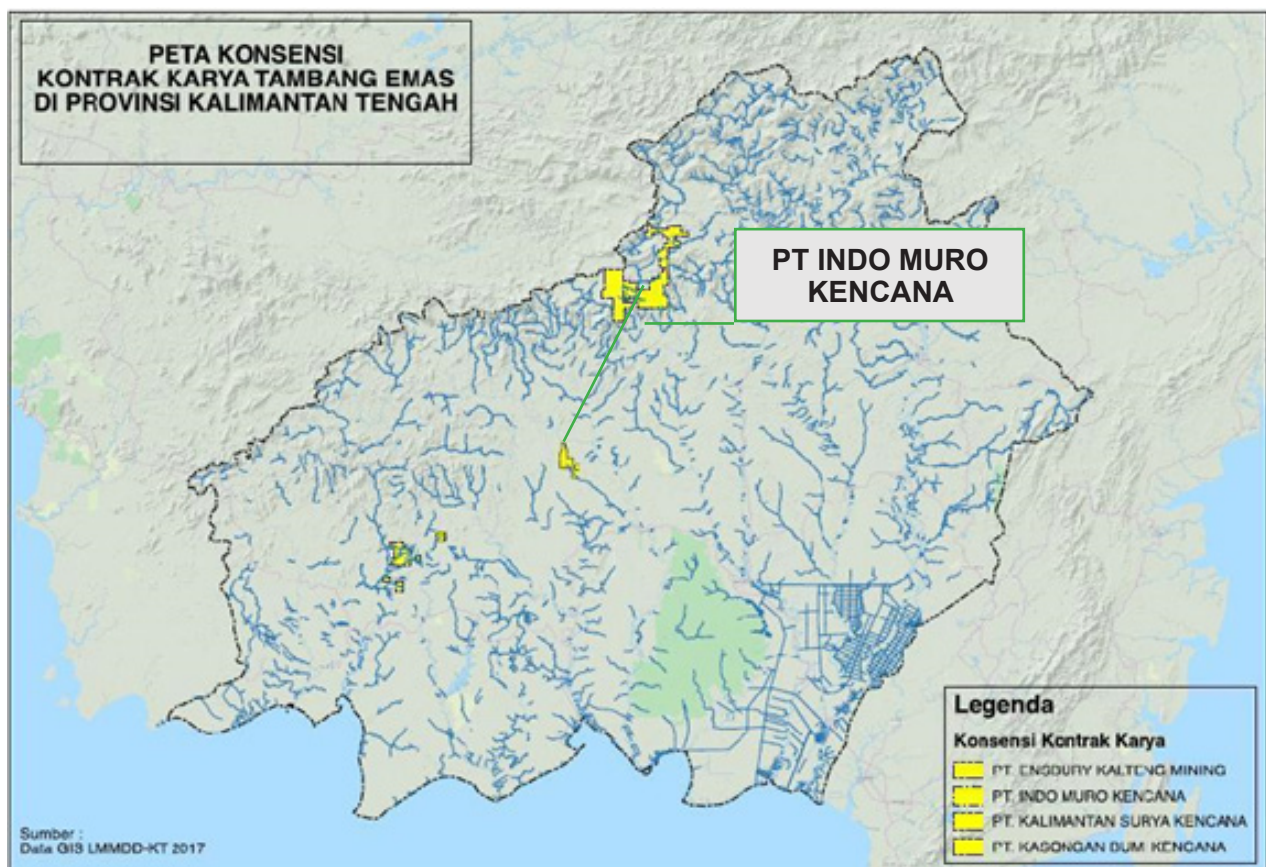
pabrik pengolahan di Kecamatan Permata Intan, Kabupaten Murung Raya, Kalimantan Tengah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.

Di studi ini, berbagai eksperimen dan analisis dilakukan guna menguji efektivitas serta efisiensi dari teknik injeksi oksigen yang berbeda dalam proses sianidasi emas dan perak. Lokasi strategis laboratorium ini memungkinkan peneliti untuk bekerja dengan bijih asli dan kondisi yang mewakili lingkungan pengolahan yang sebenarnya.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa alat dan bahan yang digunakan diantaranya

seperti pipet volumetri 10mL, buret 10 mL, pH meter, DO meter, *air stone*, *buchner funnel*, *sput* (suntikan), *reactor* 6000 mL, *marsh funnel*, *bucket*, neraca analitis, kaca arloji, *pulp density scale*, *stopwatch*, kawat saring, vakum filter, dan kertas saring. Adapun bahan yang digunakan meliputi aquades, H_2O_2 , serta *slurry input* dan *output* dari tangki pelindian.

Penelitian dimulai dengan pengambilan sampel *slurry* dari tangki pelindian, yang kemudian ditimbang untuk mendapatkan persen solid dan diukur viskositasnya. Selanjutnya, pelindian dilakukan pada reaktor dengan



Gambar 1. Lokasi Penelitian
(GIS LMMDD-KT, 2017)

pengambilan sampel pada waktu tertentu, yaitu pada jam ke-0, 2, 4, 8, 24, 32, dan 48. Namun, untuk sampel RHS *slurry*, diambil dari keluaran tangki pelindian dengan asumsi proses pelindian terjadi di lapangan. Selanjutnya, dilakukan penambahan H₂O₂ sebanyak 4 mL pada sampel PRI pada jam ke-0, 2, dan 4, dan dilanjutkan dengan uji CIL pada jam ke-16 dengan penambahan karbon aktif sebanyak 10 gpl. Setiap sampel yang diambil pada waktu tertentu, selanjutnya diukur pH dan DO-nya, dan diambil sebanyak 200 mL.

Setelah itu, dilakukan filtrasi terhadap padatan dan cairan untuk mengukur kadar Au dan Ag pada sampel tersebut. Penelitian ini dilakukan sebanyak 14 kali dengan variasi *range* persen solid dari 38% hingga 42% pada volume 5000 mL, dengan tujuan untuk menghasilkan data yang representatif mengenai ekstraksi dan konsumsi natrium sianida dari masing-masing teknik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari setiap teknik terdiri dari dua aspek utama, yaitu ekstraksi emas dan perak, serta proses konsumsi sodium sianida yang dikelola melalui perangkat lunak *Microsoft Excel*. Melalui pengolahan yang teliti, dihasilkan informasi berharga yang mencerminkan nilai ekonomis dari seluruh proses ini.

3.1. Analisa Hasil Ekstraksi Emas dan Perak

Data hasil dari pengujian *Leach Test* berupa jumlah logam di *solution* dan jumlah logam di *tailing (solid)*. Sehingga berdasarkan data tersebut, dapat dilakukan perhitungan persen ekstraksi emas dan perak dari pengujian yang telah dilakukan (Yanuar & Suprpto, 2015). Adapun rumus perhitungan persen ekstraksi ialah sebagai berikut:

$$\% \text{ Ekstraksi} = \frac{M \text{ di Sln}}{M \text{ di Tail} + M \text{ di Sln}} \times 100\% \quad (1)$$

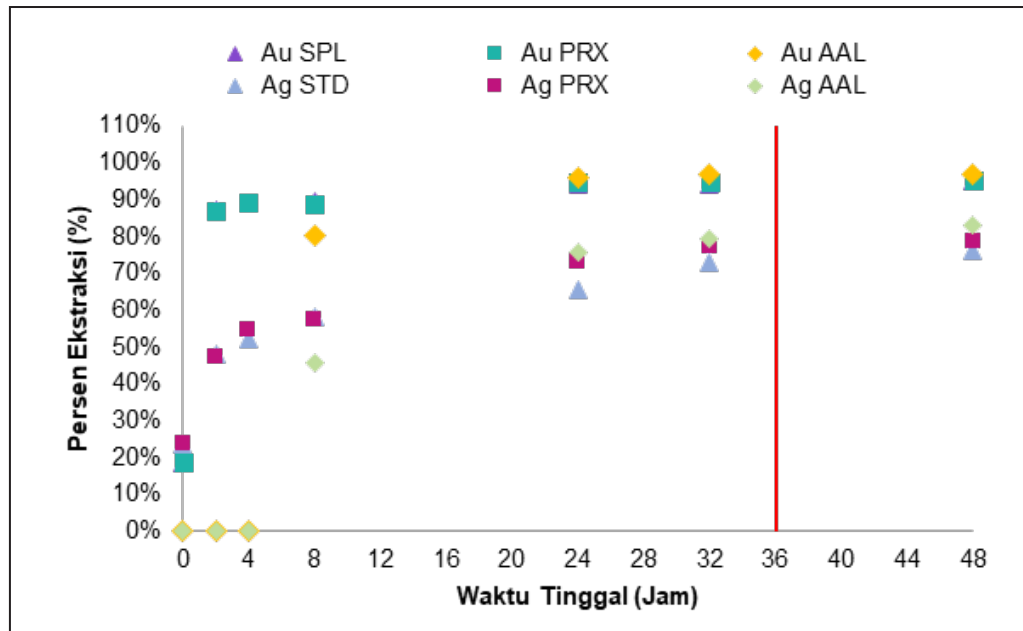
Keterangan:

M di sln : Massa Logam di Solution

M di Tail : Massa Logam di Tail Solid

Setelah dihitung, data tersebut disajikan dalam Gambar 2, memungkinkan pengamatan tren pada grafiknya. Hasil pengujian ekstraksi emas dan perak pada berbagai teknik, seperti SPL, PRI, dan RHS, ditampilkan dalam Gambar 2, di mana efek teknik terlihat secara visual.

Berdasarkan persen ekstraksi emas dari ketiga teknik peningkatan DO, teramati bahwa pada jam ke-24 semua teknik memiliki kecenderungan stabil hingga jam berikutnya dengan persen ekstraksi emas tertinggi pada jam ke-48 yaitu pada teknik RHS sebesar 97,06% sementara untuk SPL dan PRI lebih rendah dibandingkan dengan teknik RHS sebesar 95,25 % dan 95,22%. Ekstraksi yang dihasilkan dari teknik peningkatan DO SPL



Gambar 2. Pengaruh waktu tinggal terhadap hasil ekstraksi dari masing-masing teknik

dan PRI tidak terlalu berbeda. Demikian pula, ekstraksi perak mencapai puncaknya pada 82,82% pada 48 jam, dan stabil mulai dari 24 jam. Namun, pada jam ke- 48 jam ekstraksi, teknik SPL dan PRI diamati berbeda sekitar 2,64 persen, menghasilkan 76,00 % dan 78,64% perak.

Pada waktu tinggal 32 jam, hasil pengujian menunjukkan bahwa teknik SPL memiliki persentase rata-rata ekstraksi Au dan Ag masing-masing sebesar 94,3 % dan 72,7 %; teknik PRI memiliki persentase 94,8 % dan 77,1 %, dan teknik RHS memiliki persentase 96,7 % dan 79,5 %. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa RHS merupakan metode dengan persentase ekstraksi emas dan perak

tertinggi. Hal ini dapat dilihat bahwa ekstraksi perak masih terus meningkat dibandingkan dengan ekstraksi emas yang secara umum akan stabil karena telah mencapai kejenuhan dalam reaksi, hal ini disebabkan karena laju kelarutan perak lebih lambat dibandingkan dengan emas namun akan meningkat dengan cepat seiring kenaikan konsentrasi sianida yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Dai & Breuer, 2013).

Nilai DO yang dihasilkan dari masing-masing teknik merupakan hasil dari perbedaan teknik untuk menghasilkan oksigen terlarut dengan masukan oksigen yang sama dari *oxygen plant* yaitu *flow* 548 kg/jam; kadar 90%-93% (berdasarkan data operasional tahun 2021-2022).

3.2. Analisa Hasil Konsumsi Sodium Sianida

Hasil dari pengujian didapatkan konsumsi reagen pelindian yaitu sodium sianida. Perhitungan konsumsi sodium sianida dari ketiga teknik peningkatan DO ini dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$K.NaCN = \frac{\text{Titrasi} \times V.Sln}{\% NaCN \times 10^6} \times \frac{1000}{W.Sld}$$

Keterangan:

K.NaCN : Konsumsi NaCN (kg/t)

Titrasi : Hasil Titrasi (ppm)

% NaCN : Kemurnian NaCN yang digunakan

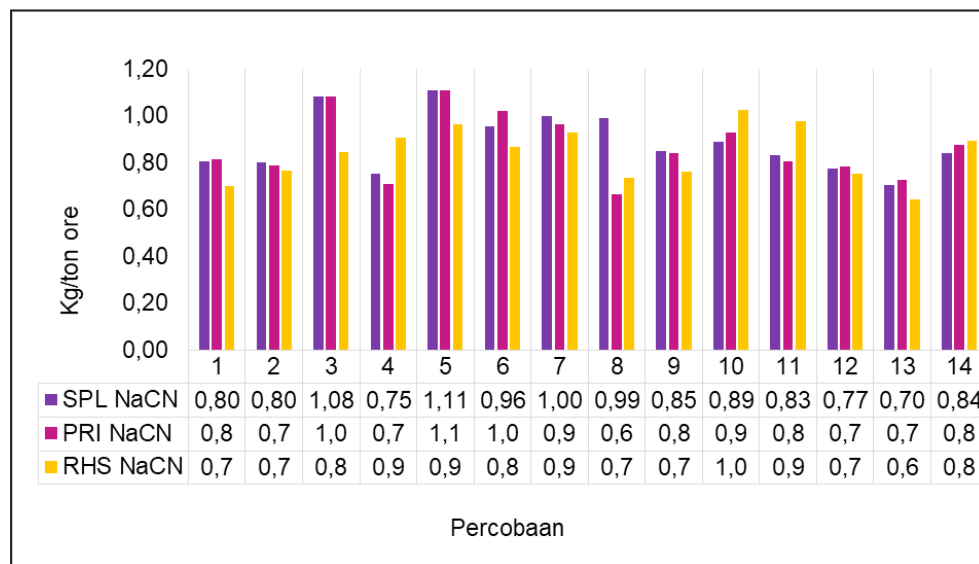
W. Sld : Berat solid awal dari slurry

Hasil perhitungan konsumsi sodium sianida didapati data pada grafik 3 Teramati bahwa

konsumsi tertinggi dari rata-rata konsumsi sodium sianida adalah teknik SPL, kemudian diikuti oleh teknik PRI dan RHS secara berurutan yaitu sebesar 0,88 kg/t, 0,87 kg/t, 0,84 kg/t pada waktu tinggal 48 jam.

Berdasarkan data waktu tinggal selama 48 jam, dapat dilihat bahwa teknik SPL menunjukkan konsumsi reagen pelindi NaCN yang paling tinggi. Hal ini terjadi karena mekanisme reaksi oksigen dalam teknik SPL berjalan secara lambat, sehingga NaCN tidak digunakan secara efisien. Di sisi lain, teknik PRI menunjukkan konsumsi NaCN yang lebih rendah karena peroksida mampu menghasilkan banyak oksigen reaktif (OH⁻) yang dapat mempercepat reaksi, menjadikannya pilihan yang lebih efisien daripada teknik SPL (Zmirli et al., 2022).

Salah satu solusi yang menarik adalah



Gambar 3. Hasil konsumsi natrium sianida dari setiap percobaan

penggunaan teknik peningkatan DO RHS (Reaktor *High Shear*), yang menggunakan tekanan tinggi untuk mendispersi oksigen menjadi gelembung-gelembung sangat kecil, meningkatkan luas permukaan kontak antara oksigen dan bijih. Dengan prinsip yang serupa dengan *nanobubble*, metode ini berhasil menghasilkan lebih banyak oksigen terlarut dibandingkan dengan teknik lainnya (Widiastuti, 2021). Sebagai hasilnya, teknik RHS mencapai persentase ekstraksi emas dan perak tertinggi, masing-masing 97,1% dan 82,8%. Selain itu, konsumsi NaCN pada teknik RHS lebih rendah, hanya sekitar 0,84 kg/ton bijih dalam waktu 48 jam, seperti yang terlihat dalam Gambar 3.

Penemuan ini memiliki potensi yang menjanjikan dalam pengolahan bijih logam, khususnya dalam meningkatkan efisiensi ekstraksi logam berharga dan mengurangi konsumsi reagen berbahaya. Dengan terus mengembangkan dan menerapkan teknik peningkatan DO RHS, diharapkan industri metalurgi dapat memperoleh manfaat positif dalam upaya mencapai proses pelindian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Studi lebih lanjut dan eksperimen yang cermat diharapkan dapat membuka peluang baru dalam peningkatan proses pelindian bijih logam yang berkelanjutan dan inovatif (Lotz et al., 2015).

3.3. Analisa Nilai Keekonomian Hasil

Ekstraksi dan Konsumsi Natrium Sianida

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pemanfaatan teknik dalam meningkatkan oksigen terlarut yang menjadi faktor pembatas laju reaksi dalam proses sianidasi. Selain itu, penelitian ini juga melakukan analisis nilai keekonomian untuk mengestimasi pendapatan kotor (*revenue*) dari penggunaan reagen NaCN dan peroksida, serta mencakup nilai ekstraksi emas dan perak, serta capex dan opex yang terlibat dalam penggunaan alat pada proses ini. Analisis nilai keekonomian ini berfokus pada penggunaan reagen NaCN dan peroksida dalam proses sianidasi, sementara penggunaan kapur (*lime*) diasumsikan tetap konstan. Dengan demikian, penelitian ini dapat secara lebih khusus menilai efektivitas dan efisiensi dari penggunaan reagen NaCN dan peroksida dalam meningkatkan oksigen terlarut dan hasil ekstraksi emas dan perak, tanpa adanya variasi penggunaan kapur.

Hasil perhitungan nilai penggunaan NaCN, peroksida, serta nilai emas dan perak yang terekstrak disajikan secara rinci dalam Tabel 1 dan 2. Data-data ini telah melalui analisis yang mendalam dan menghasilkan estimasi pendapatan kotor dari masing-masing teknik serta biaya penggunaan alat yang terlibat dalam proses sianidasi. Penelitian ini memiliki relevansi penting dalam konteks pengolahan bijih logam, terutama dalam upaya

Tabel 1. Biaya penggunaan reagen natrium sianida (NaCN) pada setiap percobaan (*batch*)

ID Sample	SPL (\$/Day)	PRI (\$/Day)	RHS (\$/Day)
B01	1721,97	1746,23	1499,96
B02	1712,04	1689,70	1638,91
B03	2313,86	2313,86	1804,71
B04	1613,28	1520,19	1944,00
B05	2375,07	2375,07	2066,36
B06	2045,02	2182,51	1851,22
B07	2142,22	2066,38	1984,51
B08	2114,53	1418,24	1576,83
B09	1817,85	1794,58	1632,54
B10	1903,18	1985,68	2195,53
B11	1775,91	1723,19	2086,70
B12	1653,82	1680,18	1610,08
B13	1507,54	1558,10	1377,14
B14	1797,29	1870,05	1911,97
Rerata	1892,40	1851,71	1798,60
Min	1507,54	1418,24	1377,14
Max	2375,07	2375,07	2195,53

Table 2. Perhitungan biaya penggunaan reagen peroksida dalam setiap percobaan (*batch*)

ID Sample	Injeksi (mL)	Injeksi (L/m ³)	Injeksi (m ³ /day)	Cost (\$/Day)
B01	4,00	0,80	6.817	3.692,6
B02	4,00	0,80	7.323	3.966,9
B03	4,00	0,80	6.774	3.669,1
B04	4,00	0,80	6.002	3.251,2
B05	4,00	0,80	7.197	3.898,1
B06	4,00	0,80	7.717	4.180,2
B07	4,00	0,80	7.183	3.890,7
B08	4,00	0,80	8.026	4.347,7
B09	4,00	0,80	6.184	3.349,7
B10	4,00	0,80	7.715	4.178,8
B11	4,00	0,80	7.656	4.147,0
B12	4,00	0,80	7.985	4.325,2
B13	4,00	0,80	7.360	3.986,9
B14	4,00	0,80	7.150	3.873,0
Rerata	4,00	0,80	7.226,1	3.911,2
Min	4,00	0,80	6.002	3.251
Max	4,00	0,80	8.026	4.348

meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses sianidasi. Dengan memahami nilai keekonomian dari penggunaan reagen NaCN dan peroksida, diharapkan industri metalurgi dapat mengambil langkah-langkah yang lebih tepat dalam memperbaiki dan mengoptimalkan proses sianidasi guna mencapai hasil yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Dengan demikian, hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan bagi perkembangan teknologi dan praktik pengolahan bijih logam, serta memberikan landasan yang kuat bagi pengambilan keputusan dalam implementasi teknik injeksi oksigen untuk meningkatkan efisiensi proses sianidasi dalam industri metalurgi.

Estimasi profit dari perbandingan teknik SPL dengan RHS, serta teknik PRI dengan RHS. Data yang dijadikan dasar dalam pembuatan grafik mencakup rata-rata tonase sebesar 4.713 dtpd, kadar emas sebesar 0,74 gpt, dan kadar

perak sebesar 25,60 gpt. Grafik yang dihasilkan memberikan gambaran visual yang lebih jelas mengenai potensi keuntungan yang dapat diperoleh dari penerapan teknik SPL dan PRI dibandingkan dengan teknik RHS dalam proses sianidasi emas dan perak. Dengan melihat grafik ini, dapat diperoleh wawasan yang lebih mendalam tentang efisiensi dan performa dari masing-masing teknik peningkatan oksigen.

Informasi yang tergambar dalam grafik ini memiliki nilai penting dalam industri pengolahan bijih logam, karena membantu para profesional dan pengambil keputusan dalam memahami perbedaan dan keuntungan yang dapat diperoleh dari masing-masing teknik. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang estimasi profit, diharapkan industri metalurgi dapat mengoptimalkan proses sianidasi dengan cara yang lebih efektif dan efisien, sehingga meningkatkan hasil produksi dan keuntungan perusahaan secara keseluruhan.

Tabel 3. Analisa biaya manfaat ketiga teknik peningkatan oksigen terlarut

Teknik	Biaya Tidak Langsung (\$/Day)	Biaya NaCN (\$/Day)	Au (%)	Ag (%)	Logam Produksi (Kg Aueq)	Produksi Au (oz)	Produksi Ag (oz)	Kadar Tail Au (gpt)	Kadar Tail Ag (gpt)
SPL	-	1892,4	95	76	4,54	107	2.949	0,04	6,15
PRI	3.911	1851,7	95	79	4,59	107	3.051	0,04	5,47
RHS	970	1798,6	97	83	4,72	109	3.213	0,02	4,40

Analisis biaya manfaat merupakan metodologi bisnis utama yang sangat relevan untuk mengevaluasi implikasi keuangan dari sebuah keputusan proyek tertentu (Tabel 3). Penting bagi istilah masukan dan keluaran dalam analisis ini untuk dapat dibandingkan dengan menggunakan satuan ukuran yang sama (Owen et al., 2021). Dalam konteks penelitian ini, konsep yang sama berlaku pada analisis penggunaan oksigen terhadap ketiga teknik peningkatan DO. Setiap teknik ini menghasilkan *output* yang berbeda, sehingga memungkinkan perbandingan dari segi hasil ekstraksi, konsumsi reagen NaCN, serta biaya tidak langsung seperti biaya operasional kapital (CAPEX), dan operasional (OPEX) dari alat yang digunakan. Dalam analisis biaya manfaat, penting untuk mencatat bahwa hasil ekstraksi merupakan indikator penting dari efisiensi dan keberhasilan teknik peningkatan DO dalam proses sianidasi. Metode reaktor *high shear* (RHS) telah terbukti mencapai tingkat ekstraksi tertinggi, yaitu sebesar 97,06%, dibandingkan dengan teknik *sparger lance* (SPL) dan *peroxide injection* (PRI). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan teknik RHS dapat memberikan manfaat yang signifikan bagi PT Indo Muro Kencana (IMK) dalam mencapai hasil yang optimal.

Selain itu, perhitungan konsumsi reagen NaCN juga menjadi faktor krusial. Penggunaan reagen yang lebih efisien dapat berkontribusi

pada penghematan biaya yang signifikan bagi perusahaan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa teknik RHS menggunakan jumlah reagen NaCN yang paling rendah, yaitu sekitar 0,84 kg per ton bijih dalam waktu tinggal selama 48 jam. Hal ini mengonfirmasi keunggulan teknik RHS dalam efisiensi penggunaan reagen, yang pada gilirannya dapat meningkatkan keuntungan perusahaan.

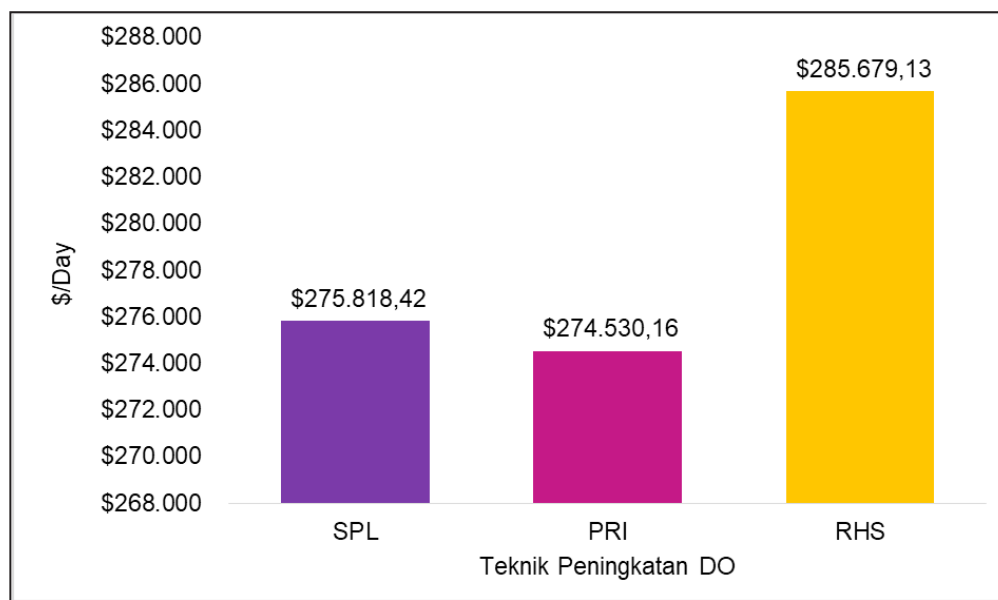
Selain biaya langsung seperti konsumsi reagen, analisis biaya manfaat juga mencakup biaya tidak langsung yang meliputi biaya operasional, CAPEX, dan OPEX dari alat yang digunakan. Evaluasi keseluruhan biaya ini menjadi penting dalam menilai efektivitas dan profitabilitas dari setiap teknik peningkatan DO. Data hasil perhitungan menunjukkan bahwa teknik RHS menghasilkan nilai ekonomis tertinggi sebesar 285.679,13 USD per hari. Angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai ekonomis dari teknik SPL dan PRI. Hal ini membuktikan bahwa penerapan teknik RHS sebagai metode terbaru di PT IMK merupakan keputusan yang tepat dalam meningkatkan efisiensi operasional dan profitabilitas perusahaan. Analisis ini merupakan alat yang efektif dalam membandingkan dan mengevaluasi ketiga teknik peningkatan DO yang diimplementasikan di PT IMK (Owen et al., 2021; Yang et al., 2021). Dengan mempertimbangkan hasil ekstraksi, konsumsi reagen, dan biaya tidak

langsung, teknik reaktor *high shear* (RHS) terbukti sebagai pilihan yang paling efisien dan menguntungkan untuk perusahaan. Keputusan untuk mengadopsi teknik RHS sebagai metode terbaru menegaskan komitmen PT IMK dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi dalam aktivitas pengolahan mineral. Dengan demikian, teknik RHS dapat menjadi suatu rekomendasi penting bagi PT IMK.

Setelah melihat nilai ekstraksi, konsumsi reagen, dan biaya *Capital Expenditure* (CAPEX) serta *Operasional Expenditure* (OPEX) dari alat reaktor dan biaya reagen yang digunakan setiap harinya, terlihat bahwa profit yang dihasilkan dari ketiga teknik peningkatan dapat dilihat dalam Gambar 4 tersebut.

Pertimbangan atas semua faktor yang berpengaruh terhadap hasil keuntungan telah diambil dengan cermat, termasuk efisiensi ekstraksi, penggunaan reagen, dan biaya modal serta operasional alat reaktor. Gambar 4 yang disajikan memberikan pandangan yang jelas mengenai potensi profit dari masing-masing teknik, dan dapat membantu dalam pengambilan keputusan untuk memilih teknik yang paling efektif dan menguntungkan bagi perusahaan.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan di Afrika Selatan, telah menunjukkan bahwa evaluasi manfaat dalam pengolahan bijih yang berkualitas berubah-ubah dapat dilakukan secara konservatif dengan mempertimbangkan



Gambar 4. Potensi profit dari masing masing teknik (hasil perhitungan revenue)

perbedaan residu dan penghematan sianida. Dalam konteks perkiraan kasar biaya-manfaat, perbedaan-perbedaan seperti tambahan perolehan emas sebesar 0,048 g/t dan penghematan sianida sebesar 0,320 kg/t dapat diaplikasikan. Integrasi angka-angka ini dengan produksi pabrik historis sekitar 300.000 t/bulan menunjukkan manfaat sekitar US\$0,5 juta untuk perolehan emas tambahan dan penghematan sekitar US\$0,2 juta untuk sianida. Dengan membandingkannya dengan perkiraan *OPEX* sebesar US\$50.000 per bulan, penerapan ini menunjukkan rasio biaya/manfaat yang sebanding dengan studi kasus sebelumnya dan diharapkan memberikan kontribusi besar terhadap keuntungan (Lotz et al., 2015). Sehingga, perusahaan dapat mengevaluasi performa dan efektivitas teknik peningkatan yang diterapkan, serta merencanakan strategi untuk meningkatkan profitabilitas dalam jangka panjang. Pendekatan yang cermat dan data yang akurat diharapkan dapat mendorong industri metalurgi untuk terus berinovasi dan meningkatkan kinerja operasional guna mencapai hasil yang lebih menguntungkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perbandingan nilai ekonomis, teknik reaktor *high shear* (RHS) menonjol sebagai pilihan terbaik dengan nilai sebesar 285.679,13 USD per hari, mengungguli kedua teknik lainnya. Hal ini menandakan bahwa

RHS adalah solusi yang lebih efektif dalam mengatasi bijih dengan kandungan sulfida dan viskositas *slurry* yang tinggi, serta mampu meningkatkan ekstraksi emas dan perak hingga 97,06% dengan penggunaan reagen yang paling efisien yaitu 0,84 kg per ton bijih. Keputusan untuk mengadopsi teknik RHS sebagai metode terbaru di PT IMK menunjukkan komitmen perusahaan dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi proses sianidasi untuk mencapai hasil yang menguntungkan, serta membuktikan keunggulannya sebagai opsi terbaik untuk pengolahan mineral yang lebih efisien dan berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PEP Bandung dan Direksi PT Indo Muro Kencana atas kesempatan untuk melakukan penelitian. Ucapan terima kasih ini disampaikan karena dukungan dan kesempatan yang memungkinkan kami untuk mengembangkan pengetahuan dan kontribusi dalam bidang metalurgi. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi yang positif bagi perusahaan.

6. DAFTAR PUSTAKA

Anderson, C. G. (2016). Alkaline sulfide gold leaching kinetics. *Minerals Engineering*, 92, 248–256. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.01.009>

- Aylmore, M. G. (2016). Alternative Lixivants to Cyanide for Leaching Gold Ores. *Gold Ore Processing*, 447–484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>
- Bas, A. D., Safizadeh, F., Ghali, E., & Choi, Y. (2016). Leaching and electrochemical dissolution of gold in the presence of iron oxide minerals associated with roasted gold ore. *Hydrometallurgy*, 166, 143–153. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2016.10.001>
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *Handbook of Clay Science* (2nd ed., Vol. 5). <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-clay-science/bergaya/978-0-08-099364-5>
- Celep, O., Altinkaya, P., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2018). Thiosulphate leaching of silver from an arsenical refractory ore. *Minerals Engineering*, 122, 285–295. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.04.011>
- Dai, X., & Breuer, P. L. (2013). Leaching and electrochemistry of gold, silver and gold–silver alloys in cyanide solutions: Effect of oxidant and lead(II) ions. *Hydrometallurgy*, 133, 139–148. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2013.01.002>
- Gui, Q., Fu, L., Hu, Y., Di, H., Liang, M., Wang, S., Zhang, L., & Dong, E. (2023). Oxidative pretreatment of refractory gold ore using persulfate under ultrasound for efficient leaching of gold by a novel eco-friendly lixiviant: Demonstration of the effect of particle size and economic benefits. *Hydrometallurgy*, 221, 106110. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2023.106110>
- Guo, P., Wang, S., & Zhang, L. (2019). Selective removal of antimony from refractory gold ores by ultrasound. *Hydrometallurgy*, 190, 105161. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2019.105161>
- Huang, D., & Kilic, M. (2019). Gold, platinum, and expected stock returns. *Journal of Financial Economics*, 132(3), 50–75. <https://doi.org/10.1016/J.JFINECO.2018.11.004>
- Ince, C. (2019). Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117871. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117871>
- Konadu, K. T., Huddy, R. J., Harrison, S. T. L., Osseo-Asare, K., & Sasaki, K. (2019). Sequential pretreatment of double refractory gold ore (DRGO) with a thermophilic iron oxidizing archaeon

and fungal crude enzymes. *Minerals Engineering*, 138, 86–94. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2019.04.043>

Konadu, K. T., Mendoza, D. M., Huddy, R. J., Harrison, S. T. L., Kaneta, T., & Sasaki, K. (2020). Biological pretreatment of carbonaceous matter in double refractory gold ores: A review and some future considerations. *Hydrometallurgy*, 196, 105434. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2020.105434>

Lotz, P., Van Der Merwe, J., Mogashoa, S., Flatman, S., & Imhof, R. (2015). *Aachen Reactors TM, a proven system to realize hidden economic potentials*. 195–210.

Owen, J. R., Kemp, D., & Marais, L. (2021). The cost of mining benefits: Localising the resource curse hypothesis. *Resources Policy*, 74, 102289. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2021.102289>

Pratomo, S. T. A. (2014). Optimization Gold Cyanidation Process to Increase Gold Extraction at Pongkor Gold Mining Business Unit Indonesia. In *Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 1081–1089). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_105

Snyders, C. A., Akdogan, G., Bradshaw, S. M., van Vreden, J. H., & Smith, R. (2018).

The development of a caustic pre-leaching step for the recovery of Au from a refractory ore tailings heap. *Minerals Engineering*, 121, 23–30. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.02.014>

Soto, C. (2020). *Do Clay Minerals affect the thickener operationin Chuquicamata mine, Calama, Chile?*

Wang, H., Zhang, X., Zhu, M., & Tan, W. (2015). Effects of dissolved oxygen and carbon dioxide under oxygen-rich conditions on the biooxidation process of refractory gold concentrate and the microbial community. *Minerals Engineering*, 80, 37–44. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2015.06.016>

Widiastuti, N. N. A. (2021, July 12). *Perbedaan Microbubble Dan Nanobubble*. Nanobubble.Id. <https://nanobubble.id/blog/perbedaan-microbubble-dan-nanobubble>

Yang, W. D., Sun, Q., & Ni, H. G. (2021). Cost-benefit analysis of metal recovery from e-waste: Implications for international policy. *Waste Management*, 123, 42–47. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.01.023>

Yanuar, E., & Suprpto. (2015). Leaching and Adsorption of Gold from Lape-Sumbawa Rocks (Indonesia) by Hypochlorite-

- Chloride. *Procedia Chemistry*, 17, 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.PROCHE.2015.12.134>
- Zmirli, Z., Driouich, A., El harfaoui, S., Mohssine, A., Mountacer, H., Sallek, B., & Chaair, H. (2022). Assessment of the principal factors influencing the silver cyanidation process by using Plackett-Burman experimental design. *Scientific African*, 16, e01137. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2022.E01137>