

PELINDIAN SIANIDASI TERHADAP BIJIH EMAS HASIL OKSIDASI DENGAN MENGGUNAKAN HIDROGEN PEROKSIDA

The Cyanidation of the Oxidized Gold Ore by Hydrogen Peroxide

Revi Timora Salajar¹, Imelda Hutabarat²

Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Geologi Mineral dan Batubara

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Jln. Jend. Sudirman No. 623 Bandung 40211

Email: revit@esdm.go.id¹, imelda.hutabarat@esdm.go.id²

ABSTRAK

Perolehan emas yang rendah pada proses sianidasi langsung bijih emas refraktori sulfida telah mendorong berbagai upaya memodifikasi proses sianidasi langsung untuk meningkatkan perolehan emasnya. Salah satunya dengan melakukan proses praolahan terhadap bijih emas refraktori sulfida dengan penggunaan bahan oksidatif sebelum proses sianidasi. Pengaruh hydrogen peroksida (H_2O_2) sebagai bahan oksidatif pada praolahan bijih emas refraktori sulfida telah diteliti. Variabel penting dalam pengujian adalah konsentrasi hydrogen peroksida, sianida, pH larutan pelindian dan ukuran partikel. Konsentrasi hydrogen peroksida dan sianida memiliki efek yang signifikan terhadap tingkat perolehan emas. Perolehan emas optimum dicapai pada konsentrasi oksidator peroksida 0.75 M dan konsentrasi sianida sebesar 0.14%. Nilai perolehan emas pada kondisi ini telah menaikkan rekovery proses dari 70,37% tanpa proses praolahan menjadi 85,19% dengan proses praolahan. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa sianidasi langsung terhadap bijih emas refraktori sulfida dengan penggunaan bahan oksidatif pada praolahan memungkinkan tetap kompetitif pada aplikasi komersialnya.

Kata Kunci: *bijih emas refraktori, pelindian sianidasi, hidrogen peroksida*

ABSTRACT

The low yield of gold in the direct cyanidation process of the sulfide refractory gold ore has led to various attempts to modify the cyanidation process directly to increase the gold yield. One of them is by conducting a pre-processed of sulfide refractory gold ore with the use of oxidative materials before the cyanidation process. The effect of hydrogen peroxide (H_2O_2) as an oxidative material on pre-processed sulfide refractory gold ore has been investigated. The important variables in the test are the concentration of hydrogen peroxide, cyanide, pH of the leaching solution, and particle size. The concentration of hydrogen peroxide and cyanide has a significant effect on the level of gold yield. An optimum gold yield was achieved at 0.75 M of the hydrogen peroxide concentration with a cyanide concentration of 0.14%. This gold yield has increased the recovery process from 70.37% (without the pretreatment) to 85.19% (with a pretreatment process). The results of this

study provide the possibility that the direct cyanidation of sulfide refractory gold ores with the use of pre-treated oxidative materials allows it to remain competitive in its commercial applications.

Keywords: refractory gold ore, leaching, cyanide, hydrogen peroxide

PENDAHULUAN

Proses pengambilan emas dari bijih mineral dengan pelindian sianidasi pertama kali diaplikasikan oleh MacArthur dan Forrest pada 1887 (Habashi, 1968). Hingga saat ini, proses sianidasi masih digunakan untuk mengekstraksi emas dari bijih mineral karena tingkat kelarutan senyawa kompleks sianida dalam melarutkan emas dan perak tertinggi di antara senyawa emas kompleks lainnya (Tabel 1), (Marsden, dkk, 2009).

Makin kompleksnya mineral pembawa emas dan halusnya partikel emas dalam bijih menyebabkan proses sianidasi langsung bijih emas membutuhkan konsumsi reagen sianida semakin tinggi untuk tetap memberikan perolehan emas relatif tinggi. Oleh karena itu, agar proses sianidasi langsung bijih emas tetap kompetitif dalam aplikasinya pada berbagai tipe bijih emas, dibutuhkan modifikasi proses. Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk memahami lebih dalam reaksi pembentukan senyawa kompleks emas sianida (Au(CN)_2^-) dan penghambat dari mineral pembawanya. Hal ini agar dapat berlangsung dengan lebih efektif reaksi antara partikel emas dalam mineral pembawanya dan larutan senyawa sianida (CN^-).

Tabel 1. Konstanta Kestabilan senyawa emas

Stability constants* for a selection of complexes of gold (I) and gold (III)

Gold (I)		Gold (III)	
Complex	β_2	Complex	β_4
Au(CN)_2^-	$2 \times 10^{36}\ddagger$	Au(CN)_4^-	$\sim 10^{56}$
$\text{Au(S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$	5×10^{23}	AuI_4^-	5×10^{47}
$\text{Au(CS(NH}_2)_2)_2$	$2 \times 10^{23}\dagger$	Au(SCN)_4^-	10^{42}
AuI_2^-	4×10^{19}	AuBr_4^-	10^{42}
Au(SCN)_2	1.3×10^{17}	AuCl_4^-	10^{26}
AuBr_2^-	10^{12}		
AuCl_2^-	10^9		

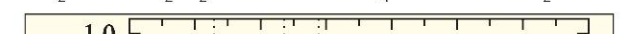
* Values of stability constants used in the chapter are taken from the tabulations of Sillen (Sillen and Martell, 1964) unless otherwise indicated.

‡ Hancock and Frinkelstein

† Calculated from standard reduction-potential data reported by Groenewald (1975)

Pada proses sianidasi langsung bijih emas mineral refraktori, mineral pembawa emas yang menghambat untuk berlangsung reaksi pelarutan emas dengan senyawa sianida (CN^-), di antaranya mineral sulfida. Mineral sulfida yang paling umum berasosiasi dalam bijih emas refraktori sulfida adalah mineral pirit (FeS_2), kalkopirit (CuFeS_2), sfalerite (ZnS), dan galena (PbS) [Chen, T.T., Cabri, J.I. and Dutrizac, J.E., 2002].

Mineral sulfida dalam bijih emas refraktori sulfida secara umum telah dipahami dengan baik bahwa ia berperan sebagai lapisindung terhadap partikel emas. Hal ini yang menjadikan perolehan emas pada sianidasi langsung bijih emas refraktori sulfida menjadi rendah. Selain itu, terjadi reaksi pembentukan senyawa kompleks sianida logam dasar seperti yang ditunjukkan untuk mineral pirit pada Gambar 1 dengan membentuk senyawa ferosianida (Fe(CN)_6^{4-}). Pembentukan senyawa kompleks sianida logam dasar akan menyebabkan penurunan efektivitas reaksi sianida dengan



Pelindian Sianidasi terhadap Bijih Emas Hasil Oksidasi dengan Menggunakan Hidrogen Peroksida
(Revi Timora Salajiar dan Imelda Hutabarat)

memungkinkan kondisi yang menguntungkan untuk kontak sianida dan oksigen dengan partikel emas yang terkandung dalam bijih sehingga meningkatkan efisiensi proses sianidasi. Di sisi lain, sulfur yang teroksidasi menjadi sulfat tidak stabil dan akan bereaksi dengan sianida untuk membentuk ion tiosianat SCN⁻. Salah satu penyebab meningkatnya konsumsi sianida selama proses sianidasi.

METODOLOGI

Preparasi Bijih

Bijih emas yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe bijih emas refraktori sulfida, berasal dari daerah Ciarinem, Garut, Jawa Barat. Bijih emas ini telah melalui proses penggerusan dan pengayakan hingga mencapai ukuran 100% - 325#. Penggerusan dilakukan dengan cara kering, sedangkan sampling dilakukan dengan metoda *Cone and Quartering*.

Kondisi Percobaan

Percobaan dilakukan menggunakan alat botol berputar (*roll bottle*), seperti pada Gambar 3, dengan media pelarut air destilasi sebanyak 500 ml pada kecepatan putaran 90 rpm, suhu kamar selama 72 jam. Percobaan ini tujuannya adalah untuk mengamati pengaruh penambahan konsentrasi hidrogen peroksida (H₂O₂) terhadap perolehan emas pada bijih refraktori.

Percobaan prasianidasi dan sianidasi dengan berbagai variabel berpengaruh. Untuk prasianidasi, variabel berpengaruh yang diamati adalah variasi konsentrasi H₂O₂. Adapun untuk proses sianidasi, variabel berpengaruh yang diamati terdiri dari persen padatan, pH, dan konsentrasi NaCN.



Gambar 3. Peralatan Botol Putar (*roll bottle*)
(Sumber: made-in-china.com)

Tabel 2. Variabel dan Kondisi Percobaan

Parameter	Jumlah
Ukuran sampel	100%-325#
Proses sianidasi	Temperatur kamar
Kekuatan Sianida	0,12 – 0,16%
Kekuatan H ₂ O ₂	10 – 90 kg/ton
Agitasi	90 rpm
Persen padatan	30 – 60%
Durasi Prasianidasi	4 jam
Durasi Sianidasi	72 jam
pH	9,5 – 12,5

PEMBAHASAN

Analisis Komposisi Kimia dengan Metode XRF

Kandungan unsur dalam bijih emas perak sebelum proses prasianidasi sebagai berikut.

Tabel 3. Analisis komposisi kimia bijih asal dengan metode XRF

No	Unsur	Kuantitas
1	Au	1,08 gr/ton
2	Ag	20,52 gr/ton
3	Cu	0,067 %
4	Pb	0,239 %
5	Fe	2,199 %
6	Zn	0,009 %
7	S	1,62 %

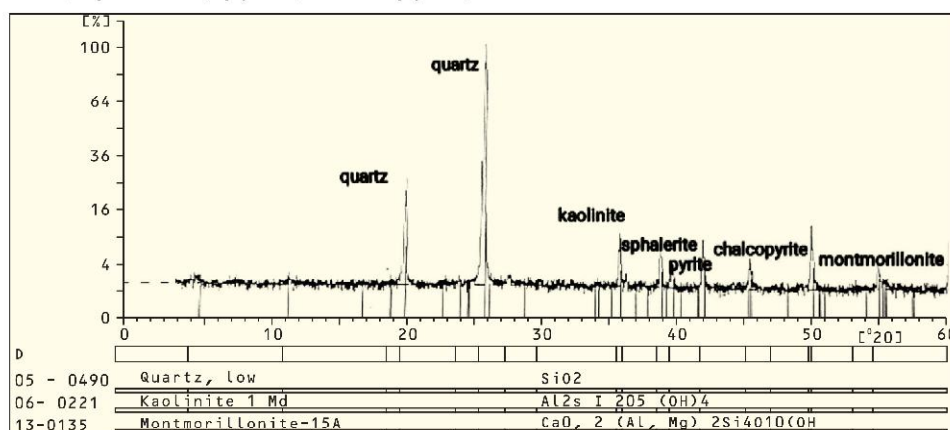
Adapun hasil analisis komposisi kimia terhadap produk padatan setelah proses prasianidasi adalah sebagai berikut.

Tabel 4. Analisis komposisi kimia bijih dengan metode XRF setelah proses prasianidasi

No	H ₂ O ₂ (kg/ton)	Kuantitas (%)				
		Cu	Pb	Fe	Zn	S
1	10	0,0567	0,2005	2,0437	0,0071	1,50
2	30	0,0605	0,2098	2,1034	0,0069	1,39
3	50	0,0620	0,2325	2,1120	0,0064	1,10
4	70	0,0628	0,2421	2,1477	0,0065	1,19

Analisis Komposisi Mineral dengan Metode Difraksi Sinar-X (XRD)

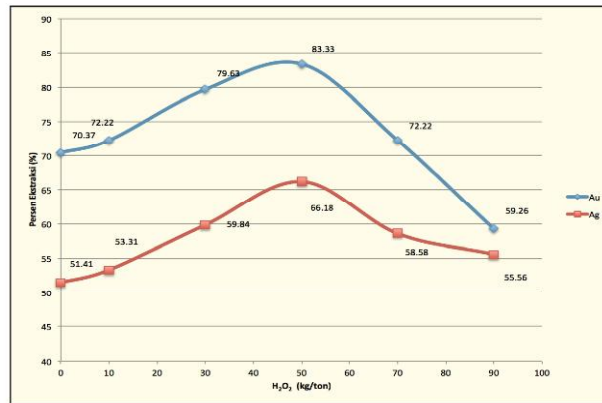
Analisis komposisi mineral dengan metode XRD dilakukan terhadap bijih emas asal dan bijih emas setelah mengalami proses oksidasi oleh H₂O₂. Dari hasil analisis XRD dengan fraksi ukuran partikel 100%-325#, terlihat bahwa komposisi mineral untuk bijih emas asal terdiri dari mineral kuarsa, kaolinite, sphalerite, pyrite, chalcopyrite, dan montmorillonite (Gambar 4).



Gambar 4. Hasil analisa XRD terhadap bijih emas awal

(1) Percobaan Prasianidasi dengan variabel H₂O₂

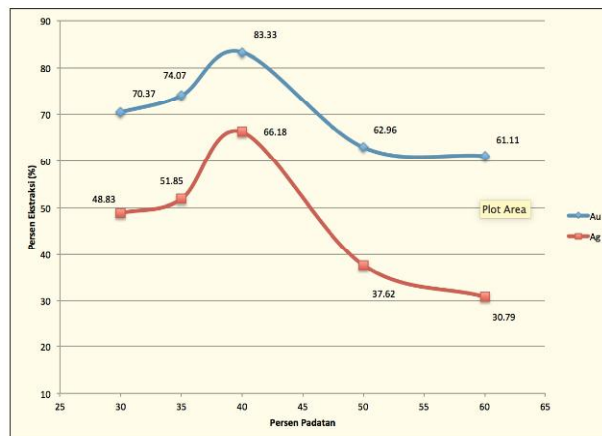
Bijih yang digunakan pada percobaan ini adalah bijih dengan fraksi ukuran partikel lolos 100%-325#. Prasianidasi dilakukan dengan menambahkan hydrogen peroksida pada berbagai variabel konsentrasi. Penggunaan H₂O₂ adalah untuk melarutkan sulfida sehingga tidak menghambat proses sianidasi karena unsur S dalam bijih akan mengikat CN⁻ membentuk SCN⁻. Kondisi percobaannya adalah 40% padatan, kekuatan NaCN 0,14%, waktu operasi prasianidasi 4 jam, sedangkan proses sianidasinya berlangsung selama 72 jam. Berikut ini hasil persen ekstraksinya:



Gambar 5. Persen ekstraksi vs konsentrasi H₂O₂

(2) Percobaan Sianidasi dengan Variabel Persen Padatan

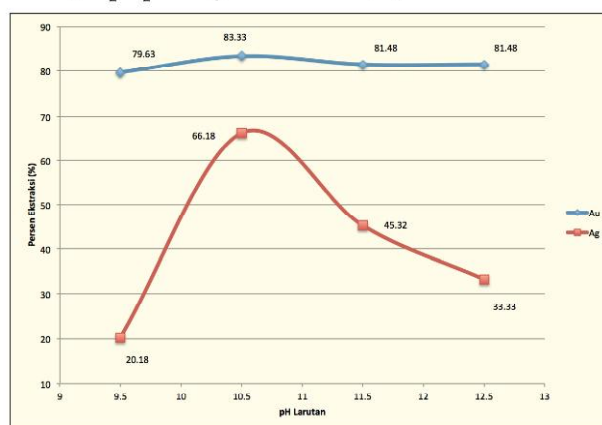
Berdasarkan hasil percobaan sebelumnya, kondisi percobaan yang menghasilkan perolehan emas-perak tertinggi, diperoleh pada kondisi proses prasianidasi dengan konsentrasi 50 kg/ton H₂O₂ dan durasi 4 jam. Adapun untuk kondisi percobaan sianidasinya dilakukan dengan kekuatan NaCN 0,14% dibuat tetap dan persen padatan dibuat sebagai variabel tidak tetap. Berikut ini hasil perolehan emas-peraknya:



Gambar 6. Persen ekstraksi vs persen padatan

(3) Percobaan Sianidasi dengan Variabel pH Larutan

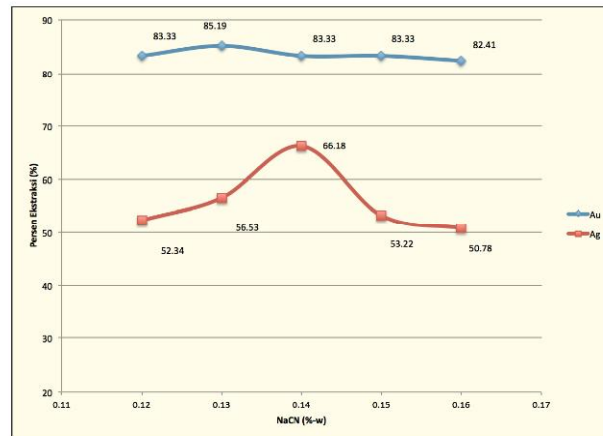
Percobaan ini bertujuan mengetahui kondisi pH larutan yang baik pada proses sianidasi. Berdasarkan hasil percobaan sebelumnya yang menghasilkan persen ekstraksi emas-perak tertinggi ada pada kondisi 0,14% NaCN, H₂O₂ 50 kg/ton dan 40% padatan. Berikut perolehan emas-peraknya:



Gambar 7. Persen ekstraksi vs pH larutan

(4) Percobaan Sianidasi dengan Variabel NaCN

Berdasarkan pada hasil percobaan sebelumnya dengan menggunakan kekuatan NaCN yang tetap, kondisi terbaik diperoleh pada 40% padatan dan 50 Kg/ton H_2O_2 . Untuk percobaan tahap ke-4 dengan menjadikan besaran kekuatan NaCN sebagai variable tidak tetap. Adapun variabel persen padatan dan konsentrasi dijadikan tetap dengan nilai besaran variable berdasarkan dari kondisi terbaik. Pada Gambar 8 disajikan hasil percobaan yang diperoleh pada kondisi tersebut. Berikut perolehan emas-peraknya:



Gambar 8. Persen ekstraksi vs konsentrasi NaCN

HASIL

Proses Prasianidasi dengan variabel H_2O_2

Peran H_2O_2 pada proses sianidasi bijih emas refraktori sulfida adalah sebagai penambahan sumber oksigen yang larut dalam larutan pelindian dan sebagai oksidator untuk mengoksidasi mineral sulfida.

- a. Sebagai sumber oksigen

Hidrogen peroksida tidak stabil di dalam air dan akan mudah terdekomposisi:



- b. Sebagai bahan oksidatif

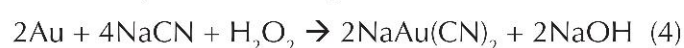
Reaksi seperti yang diperlihatkan pada persamaan reaksi (2):



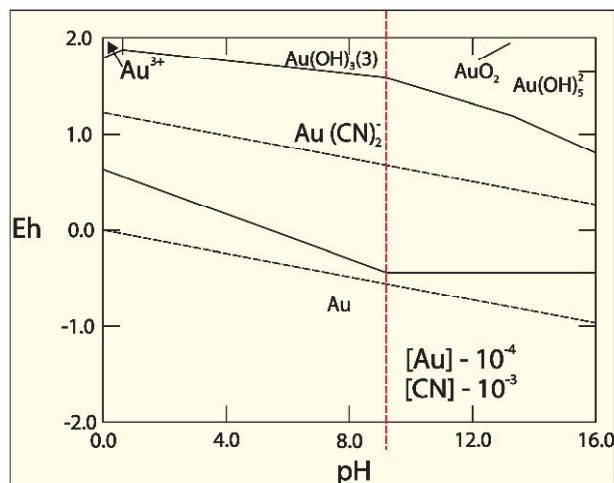
Untuk berlangsungnya proses sianidasi bijih emas sangat membutuhkan oksigen terlarut untuk mencapai efektivitas reaksi pembentukan senyawa emas sianida ($Au(CN)_2^-$) maupun ($Au(CN)_4^-$). Oleh karena itu, aerasi oksigen selama proses sianidasi bijih emas mutlak dibutuhkan.

Habashi (1968), mengemukakan bahwa pelarutan emas-perak dalam media sianida dan H_2O_2 tanpa oksigen prosesnya lambat dan hanya memberikan peran kecil.

Adapun persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Berdasarkan pada gambar diagram Eh-pH di bawah ini menunjukkan bahwa Au akan membentuk senyawa terlarut $NaAu(CN)_2$ sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan reaksi (4) dengan bentuk ion senyawa $Au(CN)_2^-$. Kondisi kelarutan Au terbaik untuk membentuk ion senyawa $Au(CN)_2^-$ pada pH >10.

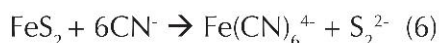


Gambar 9. Diagram Eh-pH Au-CN-H₂O pada suhu 25°C
(Sumber: Habashi, 1968)

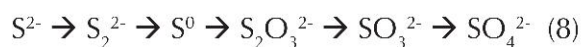
Perolehan emas dan perak mengalami peningkatan dengan bertambahnya konsentrasi H₂O₂. Namun, pH larutan akan menurun karena dihasilkannya ion H⁺ seperti yang diperlihatkan oleh persamaan reaksi (1) di atas. Persamaan reaksi tersebut menunjukkan jika reaksi berlangsung ada efek lain, selain oksidasi mineral sulfida, dihasilkannya ion H⁺ yang dapat menurunkan pH larutan pelindian.

Reaksi oksidasi mineral sulfida oleh hidrogen peroksida menjadikan partikel emas terbebas dari lapisindung mineral sulfida. Dengan begitu, diharapkan reaksi pelarutan partikel emas oleh ion sianida membentuk senyawa Au(CN)₂⁻ dapat berlangsung dengan efektif.

Pada proses sianidasi, mineral sulfida akan mengalami reaksi berikut ini:



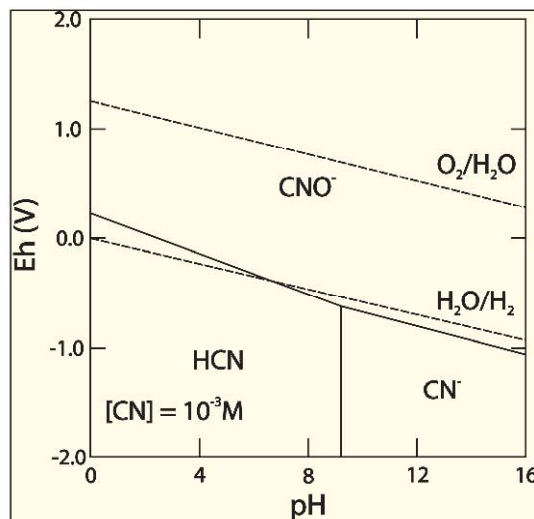
Selama proses pelindian bijih emas berlangsung pada tekanan tetap, pembentukan ion sulfida akan berlangsung dengan tahapan reaksi oksidasi seperti yang dituliskan oleh persamaan reaksi berikut ini:



sedangkan untuk oksidasi sianida berlangsung seperti reaksi dibawah ini:

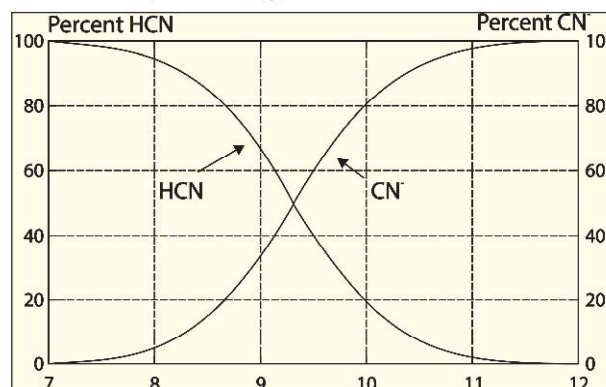


Pada Gambar 5 terlihat bahwa penurunan perolehan emas-perak terjadi pada konsentrasi 70 kg/ton H₂O₂. Hal ini dapat dijelaskan dengan melihat persamaan reaksi (1), menunjukkan dihasilkan ion hidrogen (H⁺) yang bersifat asam sehingga akan dimungkinkan terjadi penurunan keasaman (< pH) larutan. Selain itu, konsentrasi H₂O₂ yang terlalu berlebih mengakibatkan terjadinya reaksi oksidasi ion sianida (CN⁻) menjadi sianat (CNO⁻) seperti yang diperlihatkan oleh persamaan reaksi (9). Apabila ditinjau dari aspek termodinamika (diagram Eh-pH) seperti dapat dilihat pada Gambar 10, pembentuk senyawa sianat (CNO⁻) sangat stabil. Pembentukan senyawa sianat menyebabkan terjadi penurunan konsentrasi ion sianida sehingga mengakibatkan penurunan efektifitas proses sianidasi.



Gambar 10. Diagram Eh-pH ion cyanate
(Sumber: E. Yilmaz; F. Ahlatci, 2017)

Berikut adalah hubungan antara pH terhadap kestabilan senyawa ion CN^- . Apabila pH mendekati nilai 9, akan terbentuk gas HCN. Bila $\text{pH} > 9.5$, gas HCN tidak akan terbentuk (Gambar 11):



Gambar 11. HCN dan CN^- terhadap pH
(Sumber: E. Yilmaz; F. Ahlatci, 2017)

Proses Prasianidasi dengan variabel Persen Padatan

Meninjau hasil perolehan emas dan perak dari percobaan sianidasi seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8, perolehan ekstraksi tertinggi untuk emas sebesar 85,19% dan untuk perak sebesar 66,18%. Masing-masing dengan kondisi percobaan sianidasi, yaitu pada 40% padatan dan 50 Kg/ton H_2O_2 dengan kekuatan NaCN sebesar 0,13% untuk emas dan 0,14% untuk perak.

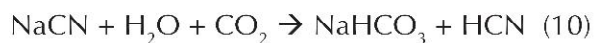
Proses Prasianidasi dengan variabel pH Larutan

Dari hasil percobaan (Gambar 7), persen ekstraksi emas-perak yang memberikan hasil optimum dicapai pada pH larutan $10,5 \pm 0,5$ sebesar 83,33% Au dan 66,18% Ag. Ini menunjukkan bahwa pelarutan emas-perak akan berlangsung baik pada pH tertentu.

Untuk mengatur pH larutan, dapat digunakan beberapa basa kuat di antaranya adalah NaOH, Na_2CO_3 , dan CaO. Dalam proses pelindian bijih emas biasanya yang sering digunakan adalah CaO sebab di samping harganya relatif murah juga memiliki kegunaan lain, yaitu:

- (1) Mencegah kehilangan sianida karena CO_2 yang berasal dari udara

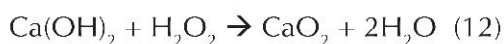
Reaksi sianidasi memerlukan oksigen. Oksigen biasanya berasal dari udara bebas yang juga mengandung CO_2 . Dengan adanya gas CO_2 yang masuk ke dalam larutan maka akan terjadi reaksi:



Akibat terjadi reaksi di atas maka akan terbentuk pula gas HCN yang mudah menguap, bukan hanya menimbulkan gas beracun, melainkan juga mengakibatkan kehilangan sianida. Penambahan CaO akan bereaksi membentuk CaCO_3 seperti pada reaksi berikut ini:

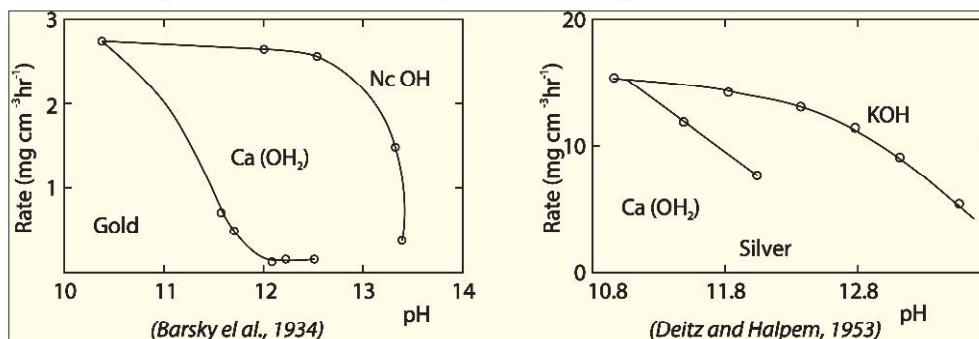


- (2) Pengontrolan pH larutan sianida sangat penting sebab reaksi pelarutan emas dan perak dapat berlangsung baik pada pH tertentu. Penggunaan CaO sebagai reagen pengatur pH harus diperhatikan sebab ion Ca^{+} pada pH yang lebih tinggi dari 12 akan menghambat kelarutan emas perak karena akan membentuk CaO_2



Kalsium Peroksida (CaO_2) yang terbentuk dan akan mengendap pada permukaan emas-perak sehingga membentuk lapisan yang menghalangi kontak dengan sianida.

Penurunan persen ekstraksi dengan semakin bertambahnya pH disebabkan oleh logam perak yang muncul sebagai mineral argentit (Ag_2S). Gasparini (1984), mengemukakan bahwa kehadiran mineral perak sulfida dapat menghasilkan lapisan film mineral sulfida sehingga mineral tersebut menutupi permukaan logam perak. Lapisan film tersebut menghambat sianida dan oksigen untuk berdifusi ke permukaan logam perak.

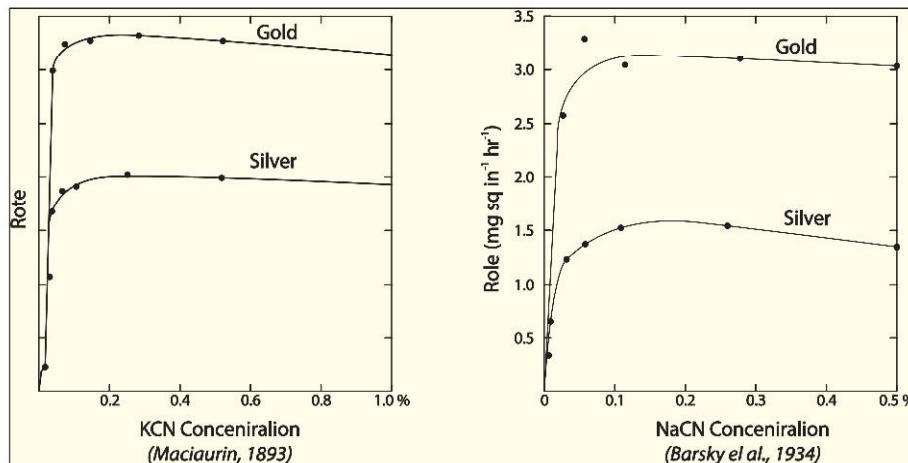


Gambar 12. Diagram laju pelarutan terhadap pH
(Sumber: Habashi, 1968)

Proses Prasianidasi dengan variabel NaCN

Hasil percobaan menunjukkan persen ekstraksi emas relatif tidak berbeda jauh dan tertinggi dicapai pada 0,13% NaCN. Hasil perolehannya 85,19% Au, sedangkan perolehan perak 66,18% pada kondisi 0,14% NaCN.

Menurut Maclaurin (1893), Barsky (1934), dan Habashi (1968), laju pelarutan emas meningkat secara linier dengan meningkatnya konsentrasi sianida hingga dicapai laju pelarutan yang maksimum pada konsentrasi tertentu. Setelah itu, meskipun konsentrasi sianida ditingkatkan lagi, laju pelarutan emas tidak mengalami peningkatan, namun justru mengalami penurunan seperti pada gambar 13 dibawah ini:



Gambar 13. Pengaruh Konsentrasi Sianida terhadap laju pelarutan
(Sumber: Habashi, 1968)

Selain itu, fenomena ini dapat dijelaskan dengan melihat persamaan laju pelarutan emas yang dikemukakan oleh Habashi (1968) sebagai berikut:

$$r_{Au} = \frac{2AD_{CN^-}D_{O_2}[CN^-]_b[O_2]_b}{\delta(D_{CN^-}[CN^-]_b + 4D_{O_2}[O_2]_b)}$$

Pada konsentrasi sianida yang tinggi, persamaan tadi dapat dituliskan sebagai berikut ini:

$$r_{Au} = 2A \frac{D_{O_2}[O_2]_b}{\delta} = k_2[O_2]_b$$

Dengan demikian, laju reaksi dikendalikan oleh konsentrasi oksigen terlarut sehingga percobaan sianidasi dengan memvariabelkan kekuatan sianida tanpa diikuti oleh peningkatan konsentrasi oksigen terlarut merupakan pekerjaan yang sia-sia.

KESIMPULAN

Hasil penelitian yang diperoleh ini telah memberikan data terhadap karakteristik peran dari hidrogen peroksida sebagai reagen oksidatif pada proses sianidasi bijih emas refraktori. Selain itu, hasil penelitian ini menunjukkan juga saling berpengaruh antara parameter proses lain yang menjadi variabel percobaan. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan hidrogen peroksida memberikan pengaruh pada peningkatan perolehan ekstraksi, baik untuk emas maupun perak. Penambahan kekuatan sianida telah mengoptimalkan peningkatan perolehan ekstraksi untuk emas maupun perak secara signifikan. Namun, penambahan lebih lanjut kekuatan sianida tidak memberikan hasil pada peningkatan perolehan ekstraksi emas. Hasil yang ditunjukkan menyebabkan terjadi penurunan perolehan ekstraksi emas dan perak. Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memungkinkan dapat dicapai perolehan ekstraksi untuk emas maupun perak yang optimal dengan lebih tinggi daripada yang telah dihasilkan dari penelitian ini. Salah satu parameter yang belum diamati secara menyeluruh dalam penelitian ini, yaitu pengontrolan tingkat kelarutan oksigen dan penstabilan pH larutan pelindian selama proses sianidasi berlangsung.

Hasil penelitian yang telah diperoleh ini dapat menjadi alternatif lain untuk diaplikasikan dalam proses prasianidasi guna meningkatkan perolehan emas perak dari bijihnya. Hal tersebut memiliki potensi dalam memainkan peran pada kemudian hari sebagai salah satu pilihan dalam proses pengolahan bijih emas refraktori.

DAFTAR PUSTAKA

- Agorhom, E.A., Skinner, W. dan Zanin, M., (2013). *Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore*, Chemical Engineering Science, Vol. 99, pp. 127–138
- Chanturia, E.L., Bortnikov, N.S., Krinov, D.I., dan Kerzin, A.L., (2005). *Interaction of internal structure, chemistry, and Processing characteristics of pyrite from the Gaik deposit*, Journal of Mining Science, Vol. 41, No. 3, pp, 268-275.
- Chen, T.T., Cabri, I.I. and Dutrizac, J.E., (2002). *Characterizing Gold in Refractory Sulfide Gold Ores and Residu*, JOM, pp. 20-22
- Habashi, Fathi (1968), *Principles of Extractive Metallurgy, volume 2 Hydrometallurgy*, Science Publishers, Paris.
- Kubaschewski, O.; Alcock, C.B., and Spencer, P.J., (1993), *Materials Thermochemistry*, 6th edition, Pergamon Press.
- Marsden, J. O. and House, C. I. (2009) *The chemistry of gold extraction. 2nd Edition. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.*
- Yilmaz, E, and Ahlatci, F. (2017) *Recovery of Cyanide from Effluents Using Carbon Dioxide*, Mugla Journal of Science and Technology, Vol. 3, No. 2, page 171-177.