

# PENGARUH PENAMBAHAN ION $\text{Ag}^+$ TERHADAP LAJU BIOOKSIDASI MINERAL SULFIDA

## Effect of $\text{Ag}^+$ Ions Addition on the Biooxidation Rate of Sulfide Mineral

SRI HANDAYANI

Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara  
Jalan Jenderal Sudirman 623, Bandung 40211  
Telp. 022 6030483, Fax. 022 6003373  
e-mail: sri@tekmira.esdm.go.id

---

### SARI

Biooksidasi merupakan metode alternatif pelindian mineral sulfida yang telah diaplikasikan secara komersial namun kinetika prosesnya masih sangat lambat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan ion  $\text{Ag}^+$  sebagai katalis terhadap laju pelarutan logam-logam bukan besi yang terkandung dalam mineral sulfida, terutama Zn dan Cu. Percobaan dilakukan menggunakan *Acidithiobacillus ferrooxidans* dalam kondisi persen padatan 10%, inokulan 5%, pH awal 2,0, temperatur kamar (24-26°C), pengadukan 150 rpm, variasi konsentrasi  $\text{Ag}^+$  0,005; 0,01; 0,02 dan 0,04 g/L. Hasil percobaan menunjukkan tanpa ion  $\text{Ag}^+$ , Zn dapat terlindi dengan baik hingga 94,1% dalam waktu 10 hari, tetapi penambahan ion  $\text{Ag}^+$  tidak dapat meningkatkan lagi ekstraksi Zn, bahkan cenderung menghambatnya. Sebaliknya, penambahan ion  $\text{Ag}^+$  dalam konsentrasi yang optimal (0,02 g/L) memberi pengaruh sangat positif terhadap ekstraksi Cu, dengan ekstraksi maksimum 80,6% setelah 10 hari dibandingkan hanya 30,2% pada kondisi tanpa penambahan ion  $\text{Ag}^+$ , berarti peningkatan ekstraksi sebesar 167%. Konsentrasi ion  $\text{Ag}^+$  lebih tinggi dari 0,02 g/L menghambat ekstraksi Cu karena diduga bersifat toksik yang menghambat pertumbuhan dan aktivitas bakteri.

Kata kunci : biooksidasi, mineral sulfida, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, katalis, ion  $\text{Ag}^+$

### ABSTRACT

*Biooxidation has proved to be a viable process for the oxidative treatment of sulfide minerals but its slow kinetics is the principle problem. This research aimed to find out the catalytic effect of  $\text{Ag}^+$  ions on the dissolution rate of the non-ferrous metals contained in the sulfide mineral, mainly Zn and Cu. Experiments were carried out using *Acidithiobacillus ferrooxidans* under the condition of pulp density 10%, initial pH 2.0, at room temperature (24-26°C), rotation speed 150 rpm. Various  $\text{Ag}^+$  ions concentrations of 0,005; 0,01; 0,02 and 0,04 g/L were examined. The results show that the addition of  $\text{Ag}^+$  did not enhanced the Zn extraction. Conversely, the addition of  $\text{Ag}^+$  had a markedly catalytic effect on the Cu extraction. Small amounts of  $\text{Ag}^+$  dramatically accelerated the Cu extraction process while large amounts had an inhibitory effect due to its toxicity that may suppress the growth and oxidation activity of bacteria resulting in lower oxidation rates, increase lag times and decrease the ultimate extent of oxidation. The optimal  $\text{Ag}^+$  concentration was found to be 0.02 g/L in which the leaching rate of Cu can be enhanced from 30.2% in 12 days to 80.6% in shorter time (8 days) or 167% increase compared to that of without the addition of  $\text{Ag}^+$ .*

Keywords : biooxidation, sulfide mineral, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, catalyst,  $\text{Ag}^+$  ions

---

## PENDAHULUAN

Selama dua dekade terakhir, industri pertambangan harus menghadapi banyak masalah seperti meningkatnya biaya penambangan dan ekstraksi, harga logam yang rendah dan tidak stabil di pasar internasional, serta masalah lingkungan yang berkaitan dengan polusi SO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pengolahan mineral, terutama mineral sulfida yang mengandung belerang tinggi. Situasi tersebut diperburuk dengan meningkatnya biaya amortisasi, makin menipisnya cadangan mineral berkadar tinggi dan yang tinggal tersisa adalah bijih mineral berkadar rendah. Industri pertambangan berusaha untuk mengurangi biaya-biaya, mengatasi batasan gas buang yang makin ketat serta terus mengembangkan teknik pengolahan mineral berkadar rendah yang ekonomis. Pengembangan metode ekstraksi menggunakan mikroorganisme telah terbukti dapat membantu industri metalurgi ekstraksi dalam mengatasi masalah-masalah tersebut dan berbagai studi terkait hal ini telah luas dipublikasikan (Neale dkk., 2011; Olson dkk., 2003; Rohwerder dkk., 2003).

Beberapa jenis mikroorganisme, khususnya dari genus *Acidithiobacillus* dapat mengoksidasi secara langsung maupun tidak langsung mineral sulfida kompleks, sehingga memungkinkan untuk melarutkan logam-logam yang terkandung di dalamnya pada medium cair asam lemah. Proses pelindian mikrobial ini mempunyai beberapa kelebihan, di antaranya dapat mengurangi konsumsi energi dan reagen kimia, biaya operasi lebih rendah dan memungkinkan untuk mengolah mineral berkadar rendah serta produk-produk sisa (ampas) (Rohwerder dkk., 2003). Namun demikian, metode ini masih mempunyai beberapa kelemahan, terutama kinetika proses yang sangat lambat. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mempercepat laju reaksi biooksidasi, misalnya dengan menggunakan berbagai jenis mikroorganisme yang diisolasi dari berbagai sumber alam (Yang dkk., 2011; Okibe dkk., 2003), melakukan rekayasa genetika terhadap mikroorganisme untuk meningkatkan kemampuannya dalam melindi (Medvedev dan Stuchebrukhov, 2001; Lemesle-Meunier dkk., 2001), memodifikasi medium pelindian (van Hille dkk., 2009; Rohwerder dan Sand, 2003; Meruane dkk., 2002), serta merancang berbagai jenis reaktor pelindian untuk meningkatkan efisiensi proses (Lu dkk., 2011; Soleimani dkk., 2009; Rawling dan Johnson, 2007; Rzhapishevskaya dkk., 2005).

Laju reaksi biooksidasi dapat ditingkatkan dengan penambahan ion katalis yang sesuai. Ion-ion terse-

but dapat memengaruhi laju reaksi-reaksi reduksi-oksidasi yang terjadi selama berlangsungnya proses pelindian mineral sulfida. Penggunaan ion-ion katalis seperti Ag, Cu, Co, Bi, Cl, Hg, As, Ru, telah berkembang sangat baik dalam sistem pelindian secara kimia namun umumnya tanpa kehadiran mikroorganisme (Guo dkk., 2010; Horta dkk., 2009; Tay and Anderson, 2008; Bolorunduro dkk., 2003; Hiroyoshi dkk., 2002; Mulak dkk., 2001). Studi mengenai penggunaan ion katalis Ag<sup>+</sup> misalnya, telah melahirkan beberapa paten dan berbagai teori telah banyak dibahas tetapi mekanisme yang sebenarnya belum diketahui secara pasti. Terakhir, Hiroyoshi dkk. (2002) dan Bolorunduro (2003) mengajukan model terbaru untuk menjelaskan peran ion Ag<sup>+</sup> dalam pelindian bijih sulfida tanpa kehadiran mikroorganisme.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan ion-ion katalis, khususnya ion perak Ag<sup>+</sup> terhadap laju reaksi biooksidasi mineral sulfida dengan menggunakan mikroorganisme *Acidithiobacillus ferrooxidans* untuk meningkatkan laju pelarutan logam yang sampai saat ini masih sangat lambat.

## METODOLOGI

### Mikroorganisme

Mikroorganisme yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Acidithiobacillus ferrooxidans* yang berhasil diisolasi dari saluran drainase tambang emas di Kalimantan Tengah. Untuk mengadaptasikan strain asli terhadap bijih sulfida sebagai substrat padat, strain asli tersebut disubkultur dengan interval waktu satu bulan dalam medium yang diberi 1% bijih sulfida. Medium subkultur mengandung komponen sebagai berikut (g/L): Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (0,01); FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (5,0); KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (0,5); MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (0,5); (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (3,0); KCl (0,1). Diperlukan enam medium transfer untuk mencapai adaptasi bakteri yang diharapkan. Setelah proses adaptasi selesai, bakteri ditumbuhkan secara aerobik dalam erlenmeyer 500 ml berisi medium 9K yang mengandung (g/L): FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (8,0); KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (0,1); MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (0,4); (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,4); KCl (0,1). Umur mikroorganisme satu minggu digunakan sebagai inokulan dalam percobaan biooksidasi.

### Bijih Sulfida

Mineral sulfida yang digunakan berasal dari Kalimantan Tengah, merupakan bijih berkadar rendah,

hanya mengandung 0,91% Cu, 8,1% Zn, 30,5% Fe dan 30,2% S. Mineral utama pembentuknya adalah pirit ( $\text{FeS}_2$ ), arsenopirit ( $\text{FeAsS}$ ), sfalerit ( $\text{ZnS}$ ) dan kalkopirit ( $\text{CuFeS}_2$ ) dengan kandungan karbonat dan pirohit yang kecil. Mineral pengotor terdiri dari kuarsa, kalsit dan felspar. Komposisi kimia dan mineralogi bijih disajikan pada Tabel 1.

bakteri tetapi tanpa penambahan katalis ke dalam medium pelindian. Di samping itu, untuk mengecek pengaruh bakteri, dilakukan percobaan kontrol tanpa kehadiran bakteri (kondisi steril) untuk setiap penambahan katalis. Percobaan dilakukan secara duplo dan hasil yang disajikan merupakan nilai rata-rata dengan deviasi maksimum 5%.

Tabel 1. Hasil analisis kimia dan mineralogi bijih sulfida

Unsur	Kandungan (%)	Mineral	Berat (%)
Cu	0,91	$\text{FeS}_2$	68,1
Zn	8,10	$\text{FeAsS}$	20,2
As	10,0	$\text{ZnS}$	7,2
Fe	30,5	$\text{CuFeS}_2$	1,2
S	30,2	Mineral pengotor	1
S ( $\text{SO}_4$ )	0,5		

Dari kandungan belerang dan sulfat dalam bijih terlihat bahwa sekitar 1% percontoh telah mengalami oksidasi sebelum percobaan dimulai. Bijih digerus dan diayak untuk mendapatkan fraksi ukuran -200 mesh untuk digunakan sebagai umpan percobaan.

### Percobaan Biooksidasi

Percobaan biooksidasi dilakukan dalam bioreaktor gelas 1 L berpengaduk. Ke dalam bioreaktor dimasukkan 600 ml medium pelindian yang mengandung (g/L):  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (0,1);  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0,4);  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (0,4) dan pH awal larutan diatur 2,0 dengan penambahan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2N. Ion katalis dilarutkan dalam medium pelindian dengan konsentrasi sebesar 0,005; 0,01; 0,02 dan 0,04 g/L menggunakan garam  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ . Setelah itu bijih sulfida berukuran 200 mesh dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 60 g (10% padatan) dan reaktor diinokulasi dengan kultur bakteri sebanyak 30 ml (5%). Pelindian berlangsung selama 20 hari dalam temperatur kamar (24-26°C) dengan kecepatan pengadukan 150 rpm. Setiap interval waktu 24 jam, diambil 5 ml percontoh larutan untuk dianalisis. Percontoh disentrifus pada 10.000 g selama 2 menit untuk memisahkan sel bakteri dan presipitat dari larutan. Konsentrasi logam-logam Cu dan Zn terlarut dianalisis menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*). pH larutan diukur dengan pH meter. Sebagai kontrol pembanding, dilakukan percobaan yang analog dengan inokulasi

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui kemungkinan adanya efek katalitik ion  $\text{Ag}^+$  terhadap laju pelarutan logam Zn dan Cu dalam proses biooksidasi mineral sulfida, berbagai variasi percobaan telah dilakukan. Kandungan logam Zn dan Cu dalam larutan sebagai fungsi dari waktu pelindian dengan penambahan ion katalis  $\text{Ag}^+$  dalam berbagai konsentrasi (0,005; 0,01; 0,02 dan 0,04 g/L), dibandingkan dengan hasil percobaan dengan kondisi yang identik tetapi tanpa penambahan ion katalis.

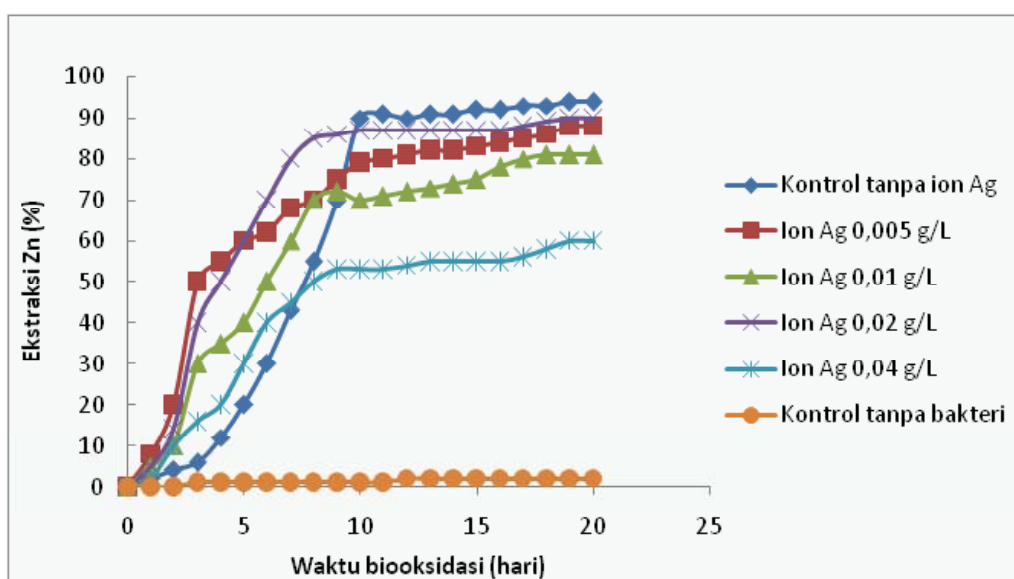
#### Pengaruh Ion $\text{Ag}^+$ terhadap Ekstraksi Zn

Gambar 1 menyajikan Zn terlarut selama proses biooksidasi dengan penambahan berbagai konsentrasi ion  $\text{Ag}^+$  dibandingkan dengan kontrol. Tanpa penambahan ion katalis, tampak bahwa kurva pelarutan Zn memperlihatkan fase lag yang singkat selama 3 hari, diikuti dengan laju pelarutan hampir linier selama 7 hari dengan perolehan 94,1% pada akhir kurva yang telah mendatar. Penambahan ion  $\text{Ag}^+$  menyebabkan akselerasi laju pelarutan awal Zn, terutama pada konsentrasi 0,005 dan 0,02 g/L  $\text{Ag}^+$ , pengaruh itu terlihat paling jelas. Namun demikian, setelah 10 hari, persen Zn total yang terekstraksi lebih kecil dibandingkan dengan percobaan tanpa penambahan ion katalis. Dengan hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa ion  $\text{Ag}^+$  tidak mempunyai efek katalitik terhadap hasil ekstraksi akhir logam Zn, bahkan pada penambahan

$\text{Ag}^+$  konsentrasi 0,04 g/L, ekstraksi Zn terhambat dan menurun sebesar 36% dibandingkan kontrol tanpa  $\text{Ag}^+$ .

Di samping itu, Gambar 1 membuktikan dengan sangat jelas peran bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* dalam proses biooksidasi mineral sulfida. Pelarutan Zn mengalami akselerasi sangat nyata dalam medium pelindian yang dikultur dengan bakteri dibandingkan kontrol tanpa pemberian bakteri (steril), yang hanya mampu melarutkan 1-2% Zn. Untuk lebih jelas, persentasi akhir ekstraksi Zn dengan berbagai variasi perlakuan telah disarikan dalam Tabel 2.

lambat (berlangsung sekitar 5 hari pertama pelindian), kemudian diikuti dengan zona kedua yang mengalami peningkatan laju pelarutan perlahan hingga mencapai 30% ekstraksi Cu pada hari ke-12. Pemberian ion katalis  $\text{Ag}^+$  pada konsentrasi 0,005; 0,01; dan 0,02 g/L secara dramatis meniadakan fase lag tersebut. Ekstraksi Cu segera terlihat jelas mulai hari ke-1 dan berhenti setelah hari ke-8 setelah 80,6% Cu dapat terekstraksi. Hasil itu menunjukkan bahwa penambahan ion  $\text{Ag}^+$  khususnya konsentrasi 0,02 g/L dapat meniadakan fase lag, menyingkat waktu proses biooksidasi selama 4 hari dan meningkatkan ekstraksi Cu sebesar 167% dibandingkan tanpa pemberian ion  $\text{Ag}^+$ . Hasil



Gambar 1. Pengaruh ion katalis  $\text{Ag}^+$  terhadap pelarutan Zn dari mineral sulfida

### Pengaruh Ion $\text{Ag}^+$ terhadap Ekstraksi Cu

Pengaruh penambahan ion  $\text{Ag}^+$  memberikan hasil yang berbeda terhadap ekstraksi Cu seperti disajikan pada Gambar 2. Tampak bahwa dengan penambahan ion  $\text{Ag}^+$ , laju pelarutan Cu meningkat signifikan dibandingkan dengan percobaan tanpa ion katalis. Perbedaan yang paling nyata tampak setelah 8 hari ketika jumlah Cu yang terekstraksi pada percobaan dengan penambahan ion  $\text{Ag}^+$  0,02 g/L adalah sebesar 80,6% atau peningkatan 167% lebih tinggi dibandingkan tanpa katalis.

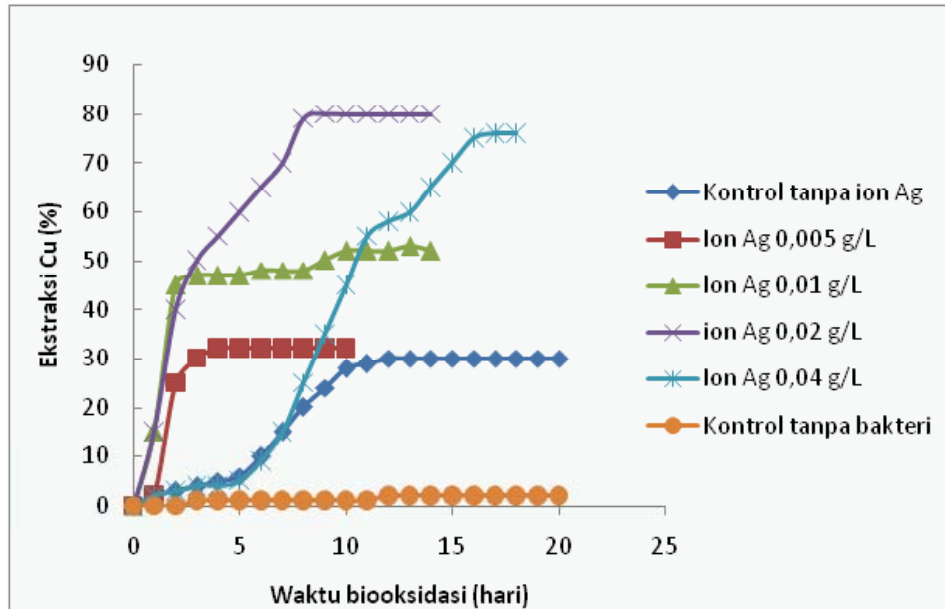
Laju pelarutan Cu tanpa pemberian katalis mempunyai 2 zona yang sangat berbeda: zona pertama merupakan fase lag dengan laju pelarutan yang

tersebut sejalan dengan hasil penelitian Weimin dkk. (2007) yang menyatakan bahwa penambahan ion  $\text{Ag}^+$  dapat mempercepat pelarutan Cu terutama pada tahap awal pelindian.

Namun demikian, pada penambahan ion  $\text{Ag}^+$  dengan konsentrasi 0,04 g/L, pertumbuhan bakteri dan aktifitas oksidasi tertekan selama 5 hari pertama pelindian sehingga fase lag dapat terlihat kembali dan persen ekstraksi Cu maksimum hanya tercapai sebesar 60% dalam waktu yang lebih lama (16 hari). Oleh karena itu, dalam penelitian ini, konsentrasi optimum ion  $\text{Ag}^+$  sebagai katalis dalam proses biooksidasi mineral sulfida untuk mengekstraksi Cu adalah 0,02 g/L dan pengaruh katalitik ion  $\text{Ag}^+$  menurun bila konsentrasinya melebihi 0,02 g/L.

Sama halnya dengan ekstraksi Zn, ekstraksi Cu pun sangat dipengaruhi oleh peran bakteri karena tanpa kehadiran bakteri, Cu hanya dapat terlarut sebesar 1-2% seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Keseluruhan hasil akhir ekstraksi Cu dengan berbagai perlakuan dapat dilihat pada Tabel 2.

konsentrasi 0,005; 0,01; 0,02; dan 0,04 g/L terhadap biooksidasi unsur belerang diperlihatkan pada Gambar 3. Nilai pH yang makin menurun menunjukkan makin banyaknya unsur belerang yang dioksidasi oleh bakteri. Dari Gambar 3 tampak bahwa dengan peningkatan konsentrasi ion  $Ag^+$ ,



Gambar 2. Pengaruh ion katalis  $Ag^+$  terhadap pelarutan Cu dari mineral sulfida

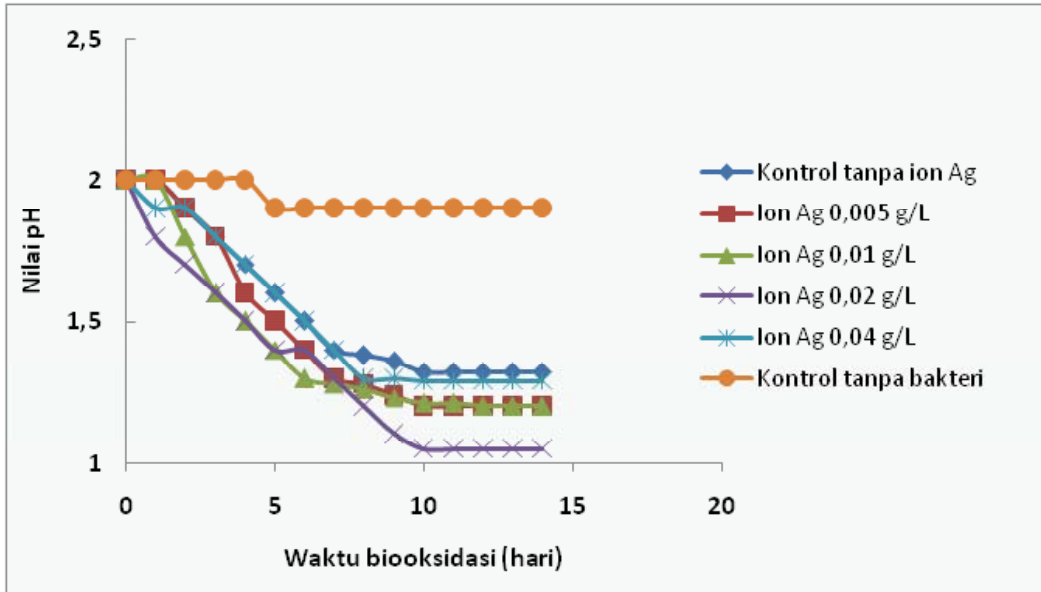
Tabel 2. Persentase akhir pelarutan Zn dan Cu tanpa dan dengan penambahan katalis  $Ag^+$  setelah proses biooksidasi selama 20 hari

Perlakuan	Ekstraksi Zn (%)	Ekstraksi Cu (%)
Kontrol tanpa $Ag^+$	94,1	30,2
$Ag^+$ 0.005 g/L	88,3	32,1
$Ag^+$ 0,010 g/L	81,0	52,0
$Ag^+$ 0,020 g/L	90,7	80,6
$Ag^+$ 0,040 g/L	60,0	76,5
Kontrol tanpa bakteri	2,1	2,0

### Pengaruh Ion $Ag^+$ terhadap Biooksidasi Belerang

Telah diketahui bahwa unsur belerang dioksidasi menjadi asam sulfat oleh bakteri sehingga laju biooksidasi unsur belerang dapat ditentukan secara kualitatif melalui pengukuran nilai pH (Chen dkk, 2008). Pengaruh penambahan ion  $Ag^+$  dengan

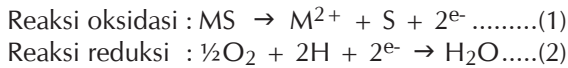
biooksidasi unsur belerang meningkat dalam 9 hari. Pada hari ke-10, dengan konsentrasi ion  $Ag^+$  0; 0,005; 0,01; 0,02; dan 0,004 g/L, nilai pHnya adalah berturut-turut 1,32; 1,20; 1,21; 1,05; dan 1,29. Nampaknya ion  $Ag^+$  meningkatkan laju biooksidasi unsur belerang paling tinggi pada konsentrasi ion  $Ag^+$  0,02 g/L.



Gambar 3. Perubahan pH selama proses biooksidasi mineral sulfida

**Diskusi**

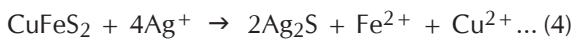
Mekanisme reaksi ion-ion katalis telah dibahas dalam beberapa literatur antara lain Guo dkk. (2010), Ballester dkk. (2007), Hiroyosi dkk. (2002). Ion-ion katalis diduga berperan melalui mekanisme elektrokimia dengan reaksi yang dapat dituliskan sebagai berikut:



Peran bakteri dalam proses ini, di samping mempercepat oksidasi Fe<sup>2+</sup> menjadi Fe<sup>3+</sup> dalam larutan, juga mengkatalisis reaksi-reaksi elektrokimia untuk menghasilkan H<sup>+</sup> yang sangat diperlukan untuk reaksi reduksi sebagai berikut:

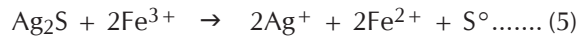


Peran ion Ag<sup>+</sup> dalam mengkatalisis reaksi pelindian kalkopirit dapat dituliskan sebagai berikut:



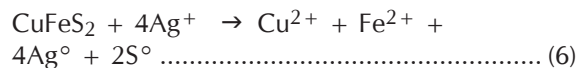
Terbentuknya lapisan Ag<sub>2</sub>S pada permukaan kalkopirit menetralkan lapisan pasivasi belerang yang ada di sana dan membentuk saluran untuk pelepasan elektron selama proses oksidasi serta memfasilitasi reaksi reduksi.

Sementara itu, secara bersamaan, reaksi bakteri menghasilkan Fe<sup>3+</sup> dari Fe<sup>2+</sup> yang juga mempercepat reaksi pelarutan logam. Lapisan Ag<sub>2</sub>S bereaksi cepat dengan oksidan (ferri sulfat) sebagai berikut:

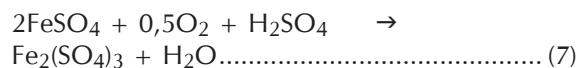


Dengan demikian ion Ag<sup>+</sup> terus dihasilkan dan kembali melakukan reaksi (4).

Di samping itu, memungkinkan juga untuk terjadinya pembentukan logam perak sebagai berikut:



Bakteri berperan secara tidak langsung dalam proses biooksidasi dengan memfasilitasi oksidasi Fe<sup>2+</sup> menjadi Fe<sup>3+</sup> dan mendepolarisasi setengah reaksi reduksi sebagai berikut:



Bila aktivitas bakteri menurun, ion ferro tidak dioksidasi menjadi ion ferro, akibatnya pelarutan kalkopirit berhenti atau walaupun masih berlangsung, terjadi dengan laju yang sangat lambat.



Regenerasi ion  $\text{Ag}^+$  dalam siklus proses biooksidasi meningkatkan laju pelarutan kalkopirit. Pengaruh ion perak diperkuat dengan keberadaan mikroorganisme pengoksidasi besi dan sulfur. Di satu sisi, bakteri mempertahankan rasio  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ; di sisi lain, bakteri juga mengoksidasi lapisan unsur belerang (reaksi 3) di permukaan kalkopirit sehingga mencegah terbentuknya lapisan pasivasi kalkopirit.

Guo dkk (2010) dalam hasil penelitiannya menyatakan bahwa pembentukan logam perak meningkatkan ketebalan lapisan di permukaan mineral yang terdiri dari campuran  $\text{Ag}_2\text{S}$  dan  $\text{Ag}^\circ$  seiring dengan berjalannya waktu pelindian dan meningkatnya konsentrasi perak. Namun demikian, kelebihan ion perak tidak meningkatkan laju pelarutan kalkopirit, malahan sebaliknya. Perak yang berlebih menyebabkan terbentuknya lapisan pasivasi perak sulfat  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  di permukaan sulfida akibat potensial oksidasi tinggi yang menjadikan larutan dekat permukaan  $\text{Ag}_2\text{S}$  menjadi jenuh oleh  $\text{Ag}^+$ . Selain itu, perak berlebih dapat menghambat pertumbuhan dan metabolisme bakteri karena bersifat toksik, akibatnya menghambat oksidasi ion ferro menjadi ion ferri serta oksidasi unsur belerang menjadi sulfat. Bakteri masih bisa mempertahankan aktivitas normal dengan keberadaan perak dalam konsentrasi rendah. Konsentrasi perak maksimum yang dapat ditoleransi sebelum muncul sifat menghambat dalam kondisi penelitian ini adalah 0,02 g/L. Telah diketahui bahwa *A. ferrooxidans* dapat mengakumulasi berbagai logam berat pada dinding selnya (Liu dkk., 2011) dan diduga perak yang menumpuk ini menyebabkan menurunnya kemampuan bakteri dalam mengoksidasi ion ferro. Oleh karena itu, bakteri yang digunakan dalam proses biooksidasi harus mempunyai sifat resisten yang tinggi terhadap unsur toksik seperti perak. Hal itu bisa dicapai dengan dua cara: pertama, dengan adaptasi bakteri secara progresif yang ditumbuhkan dalam kultur medium yang mengandung ion perak dengan konsentrasi yang meningkat; kedua, dengan rekayasa genetika, mutasi dan seleksi bakteri. Melalui kedua cara tersebut, diharapkan jangka waktu fase lag pertumbuhan bakteri dapat dipersingkat atau bahkan ditiadakan dan meningkatkan hasil ekstraksi akhir.

Untuk mengatasi masalah toksisitas perak, dapat juga digunakan perak klorida sebagai pengganti perak sulfat karena perak klorida telah diketahui mempunyai toksisitas yang lebih rendah dibandingkan dengan perak sulfat, namun hal itu perlu

dibuktikan dengan penelitian tersendiri. Walau demikian, konsentrasi perak yang diperlukan dalam mengkatalisis proses biooksidasi adalah kecil; dan untuk setiap jenis katalis atau mineral tertentu terdapat konsentrasi optimal untuk dapat mengekstraksi jenis logam tertentu secara selektif. Yuehua dkk. (2002) melakukan studi pelindian kalkopirit menggunakan jenis katalis perak yang berbeda, yaitu ion perak, perak sulfida dan konsentrat pembawa perak. Studi itu membuka kemungkinan penggunaan berbagai senyawa perak yang murah sebagai katalis.

Dari uraian di atas, maka persoalan utama berkaitan dengan efektifitas katalisis proses biooksidasi menggunakan ion perak adalah keberadaan perak dalam larutan atau padatan, dan toksisitas perak terhadap mikroorganisme. Efek katalitik perak bisa berhenti ketika terjadi presipitasi sebagai unsur logam, atau sebagai  $\text{Ag}_2\text{S}$  yang terbentuk pada permukaan mineral (tipe jarosit).

Dari aspek ekonomi, perak yang digunakan sebagai katalis harus bisa diambil kembali (*recovery*) untuk digunakan lagi dalam siklus proses. Setelah proses pelindian selesai, mayoritas perak akan tinggal pada residu pelindian seperti telah dibuktikan dalam penelitian ini melalui pengukuran konsentrasi perak dalam residu. Residu padatan dapat dipisahkan dari medium, dan peraknya bisa diambil kembali dengan metode yang telah umum digunakan seperti dengan pelindian menggunakan asam kuat, klorin, asam klorida, atau dengan pelindian menggunakan amonia dalam kondisi basa. Pengambilan kembali perak mungkin lebih mudah jika dilakukan ketika proses belum sepenuhnya selesai bila dibandingkan pada akhir proses karena pada akhir proses, perolehan kembali bisa terhambat oleh pembentukan jarosit perak.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Pada proses biooksidasi mineral sulfida dengan penambahan ion katalis  $\text{Ag}^+$ , Cu secara selektif terekstraksi lebih baik dibandingkan tanpa penambahan katalis dengan 3 cara: mempersingkat atau bahkan meniadakan fase lag, meningkatkan laju ekstraksi dan memperbaiki tingkat oksidasi akhir. Berbagai kemungkinan mekanisme reaksi biooksidasi yang berlangsung selama percobaan ini telah dibahas namun hal itu perlu dianalisis lebih lanjut dengan menggunakan analisis SEM

(Scanning Electron Microscope) dan EDX (Energy Dispersive X-ray) terhadap residu pelindian, serta analisis AFM (Atomic Force Microscopy) terhadap struktur dinding sel bakteri sebelum, selama dan setelah proses bioooksidasi selesai.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terlaksana atas dana Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Sdri. Ani Suryani atas bantuan analisis kimia menggunakan AAS dan kepada Sdr. Andang Setiawan dari Institut Teknologi Bandung atas bantuan penyediaan percontoh mineral sulfida sebagai bahan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ballester, A., Blazquez, M.L., Gonzales, F., and Muzoz, J.A., 2007. Catalytic role of silver and other ions on the mechanism of chemical and biological leaching. Dalam: *Microbial processing of metal sulphides (E.R. Donati dan W. Sand eds.)*, Springer, p. 77-101.
- Bolorunduro, S.A., Dreisinger, D.B., and Van Weert, G., 2003. Fundamental study of silver deportment during the pressure oxidation of sulfide ores and concentrates. *Miner Eng* 16, p. 695-708.
- Chen, S., Qin, W., and Qiu, G., 2008. Effect of Cu<sup>2+</sup> ions on bioleaching of marmatite. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China Vol. 18, Issue 6*, p. 1518-1522.
- Guo, P., Zhang, G., Cao, J., Li, Y., Fang, Z. and Yang, C., 2010. Catalytic effect of Ag<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> on leaching realgar As<sub>2</sub>S<sub>2</sub>. *Hydrometallurgy Vol. 106, issue 1-2 February*, p. 99-103.
- Hiroyoshi, N., Arai, M., Miki, H., Tsunekawa, M., and Hirajima, T., 2002. A new reaction model for the catalytic effect of silver ions on chalcopyrite leaching in sulphuric acid solution. *Hydrometallurgy Vol 63, issue 3 March*, p. 257-267.
- Horta, D.G., Acciari, H.A., Bevilaqua, D., Benedetti, A.V., Garcia, O., 2009. The effect of chloride ions and A. ferrooxidans on the oxidative dissolution of the calcopyrite evaluated by electrochemical noise analyses (ENA). *Advanced Materials Research Vol 71-73*, p. 397-400.
- Lemesle-Meunier, D., Basseur, G., Tron, P., Bennaroch, D., Nitschke, W., Elbehti, A., 2001. The membrane-bound c type cytochromes and the interaction between the downhill and uphill electron transfer pathways in the acidophilic chemolithotrophic ferrous ion oxidizing bacterium Thiobacillus ferrooxidans. In: *Ciminelli VST Garcia O. Jr (eds) Process Metallurgy vol 9A*, Elsevier, Amsterdam.
- Liu, J., Li, D., Zhang, S., Li, D., and Yu, L., 2011. The effect of silver ion catalysis on bioleaching of chalcopyrite tailings. *Applied Mechanics and Materials Vol 84-85*, p. 635-640.
- Lu, L.L., Li, D.W., and Yu, L., 2011. Study on intensified bioleaching technology by static magnetic field of chalcopyrite tailings. *Applied Mechanics and Materials vol. 84-85*, p.476-479.
- Medvedev, D. and Stuchebrukhov, A.A., 2001. DNA repair mechanism by photolyase: electron transfer path from the photolyase catalytic cofactor FADH to DNA thymine dimer, *J Ther Biol* 210, p. 237-248.
- Meruane G., Salhe C., Wiertz J., Vargas T., 2002. Novel electrochemical-enzymatic model which quantifies the effect of the solution Eh on the kinetics of ferrous iron oxidation with Acidithiobacillus ferrooxidans. *Biotechnol Bioeng* 80:280-288.
- Mulak, W., Chojnacka, M., Wawrzak, D., 2001. Mechanism of catalytic action of cupric ions in ferric salts leaching of millerite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 35, p. 67-72.
- Neale, J.W., Gericke, M., and Ramcharan, K., 2011. *The application of bioleaching to base metal sulfides in Southern Africa: Prospects and opportunities, 6th Southern African Base Metal Conference*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Okibe, N., Gericke, M., Hallberg, K.B., and Johnson, D.B., 2003. Enumeration and characterization of Acidophilic microorganisms isolated from a pilot plant stirred-tank bioleaching operation. *Appl Environ Microbiol.* 69(4), p.1936-1943.
- Olson G.J., Brierley J.A., Brierley C.L. , 2003. Progress in bioleaching: Applications of microbial processes by the minerals industries. *Appl Microbiol Biotechnol. Vol 63, no.3*, p. 249-257.
- Rawling, D., and Johnson, D.B., 2007. The microbiology of biomining: development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia. *Microbiology vol. 153 no. 2*, p. 315-324.
- Rohwender, T., Gehrke, T., Kinzler, K., and Sand, W., 2003. Bioleaching review part A : Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Appl. Microbiol Biotechnol* 63, p. 239-248.



- Rohwerder T., Sand W., 2003. The sulfate sulfur of persulfides is the actual substrate of the sulfur-oxidizing enzymes from *Acidithiobacillus* and *Acidiphilium* spp. *Microbiology* 149:1699-1709 p.
- Rzhapishevskaya, O.I., Lindström, E.B., Tuovinen, O.H., and Dopson, M., 2005. Bioleaching of sulfidic tailing samples with a novel, vacuum-positive pressure driven bioreactor. *Biotechnology and Bioengineering* Vol 92, Issue 5, p. 559-567.
- Soleimani, M., Hosseini, S., Roostaazad, R., Petersen, J., Vasiri, A.K., 2009. Microbial leaching of a low-grade sphalerite ore using a draft tube fluidized bed bioreactor. *Hydrometallurgy* 99, p. 131–136.
- Tay, P.R., and Anderson, C.G., 2008. *Technology and Engineering, in: Proceedings of the Sixth International Symposium of Hydrometallurgy*, C.A Young eds. p. 645-651.
- van Hille R P, Bromfield L.V., Botha S.S., Jones G., van Zyl A.W. and Harrison S T L, 2009. *The effect of nutrient supplementation on growth and leaching performance of bioleaching bacteria. Proceedings of the 18th International Biohydrometallurgy Symposium* (Eds. Donati ER, Viera MR, Tavani EL, Giaveno MA, Lavalle TL and Chiacchiarini). Trans Tech Publications. p. 413-416.
- Yang, T., Lyons, S., Aguilar, C., Cuhel, R., and Teske, A., 2011. Microbial communities and chemosynthesis in Yellowstone Lake sublacustrine hydrothermal vent waters. *Frontiers in Microbial Physiology and Metabolism* Vol 2.
- Yuehua, H., Guanzhou, Q., Jun, W., Dianzuo, W., 2002. The effect of silver-bearing catalysts on bioleaching of chalcopyrite. *Hydrometallurgy* 64, p. 81-88.
- Weimin., Z., Shifei, G., 2007. *Catalytic effect of silver ion on the bioleaching of low grade chalcopyrite ore from Yongping Copper Mine*, Mining Research and Development (06).