

Pengolahan *Tailing* Sianidasi Bijih Emas dengan Proses Oksidasi-Presipitasi pada kondisi *Batch* dalam Skala Laboratorium.

Asep Nurohmat Majalis¹, Rahmar Setiawan Mohar², Yeni Novitasari³ dan Anindita Hardianti⁴

¹ Pusat Riset Kimia Maju, BRIN; e-mail: asep039@brin.go.id; asepnurohmatmajalis@gmail.com

² Pusat Riset Fotonik, BRIN

³ Pusat Riset dan Teknologi Pertambangan, BRIN

⁴ Badan Riset dan Inovasi Nasional, BRIN

ABSTRAK

Sianidasi adalah alternatif proses pengolahan bijih emas di pertambangan emas skala kecil untuk mengganti amalgamasi. Sianidasi berdampak negatif terhadap lingkungan karena menggunakan bahan kimia berbahaya dan beracun yaitu sianida, namun sianidasi relatif mudah dikendalikan. Sianidasi menimbulkan *tailing* yang mengandung sianida dan logam berat dan konsentrasinya tergantung pada komposisi bijih serta kondisi proses sianidasi. Pengolahan *tailing* sianidasi dengan proses oksidasi-presipitasi menggunakan SO₂ yang bersumber dari Na₂S₂O₅ dan O₂ yang bersumber dari udara serta katalis Cu(II) dilakukan untuk menurunkan konsentrasi sianida dan logam berat terlarut pada *tailing* sianidasi hingga bisa memenuhi kelayakan kualitas air limbah. Pengolahan dilakukan pada kondisi *batch* skala laboratorium dengan tahapan penentuan parameter proses pada skala 1 liter dan dilanjutkan dengan uji aplikasi parameter proses pada skala 20 liter. Parameter proses oksidasi-presipitasi yang ditentukan secara berurutan yaitu: konsentrasi katalis Cu(II), pH, waktu, dan rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻. Aplikasi parameter proses yaitu konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, pH 9, waktu pengolahan 5 jam dan rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻ 75 mampu menghasilkan persen penurunan konsentrasi sianida bebas, WAD sianida dan total sianida pada fasa cair *tailing* secara berturut-turut yaitu 99,84%; 99,82% dan 99,70% dan pada fasa padat *tailing* secara berturut-turut yaitu 98,28%; 99,56% dan 99,52%. Aplikasi parameter proses tersebut juga mampu menurunkan konsentrasi logam berat terlarut As, Cu, Pb dan Zn dalam fasa cair *tailing* dengan nilai persen penurunan secara berturut-turut yaitu 60%; 98,7%; 67,47% dan 99,94%. Pengolahan *tailing* sianidasi menggunakan proses oksidasi-presipitasi pada kondisi *batch* dalam skala laboratorium pada parameter proses yaitu konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, pH 9, waktu pengolahan 5 jam dan rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻ 75 telah mampu menurunkan konsentrasi sianida dan logam berat terlarut dalam fasa cair *tailing* sianidasi sehingga memenuhi nilai baku mutu yang ditetapkan.

Kata kunci: amalgamasi, sianidasi, *tailing*, oksidasi-presipitasi, parameter proses, uji aplikasi, baku mutu

ABSTRACT

Cyanidation is an alternative gold ore processing in small-scale gold mining to replace amalgamation. Cyanidation harms the environment because of uses toxic and hazardous chemicals i.e cyanide, however, it's easy to control relatively. Cyanidation generates tailing containing cyanide and heavy metals that concentration is dependent on ore composition and cyanidation process condition. For reducing the concentration of cyanide and dissolved heavy metals in tailing to comply with wastewater quality, cyanidated tailing treatment by oxidation-precipitation using SO₂ from Na₂S₂O₅, O₂ from the air, and Cu(II) catalyst has been conducted. The treatment is carried out on batch conditions in a laboratory scale with stages determining the process parameters on 1 liter followed by testing application process parameters on 20 liters. The process parameters for the oxidation-precipitation were determined sequentially, i.e concentration of Cu(II) catalyst, pH, time, and Na₂S₂O₅/CN⁻ weight ratio. Application test at a concentration of Cu(II) 50 mg/L, pH 9, treatment time of 5 hours, and Na₂S₂O₅/CN⁻ weight ratio of 75 was able to obtain percentage removal concentration of free cyanide, WAD cyanide, and total cyanide in the liquid phase of tailing i.e 99.84%; 99.82%; and 99.70%, and in the solid phase of tailing i.e 98.28%; 99.56%; and 99.52% respectively. The application test was also able to reduce the concentration of dissolved heavy metals As, Cu, Pb, and Zn in the liquid phase of tailing with percentage removal values i.e 60%; 98.7%; 67.47%; and 99.94% respectively. Treatment of cyanidated tailing uses the oxidation-precipitation process on batch condition in laboratory scale at parameter process i.e concentration of Cu(II) catalyst 50 mg/L, pH 9, treatment time of 5 hours, and Na₂S₂O₅/CN⁻ weight ration of 75 has been reduced concentration of cyanide and the total concentration of dissolved heavy metals in the liquid phase of tailing to meet the specified quality standard values.

Keywords: amalgamation, cyanidation, tailing, oxidation-precipitation, process parameters, application test, standard values

Citation: Majalis, A.N., Mohar, R.S., Novitasari, Y., dan Hardiati, A., (2022). Pengolahan *Tailing* Sianidasi Bijih Emas dengan Proses Oksidasi-Presipitasi pada kondisi *Batch* dalam Skala Laboratorium. Jurnal Ilmu Lingkungan. 20 (1), 757-768, doi: 10.14710/jil.20.4.757-768

1. PENDAHULUAN

Pengolahan emas pada pertambangan emas skala kecil (PESK) umumnya dengan proses amalgamasi menggunakan merkuri (Hg) yang dilakukan di dalam gelundung/*chanca*. Amalgamasi dipilih karena prosesnya cepat, mudah diakses, dan biayanya lebih rendah dibandingkan dengan metode lain, namun proses ini melepaskan merkuri ke lingkungan pada level yang tinggi (Teixeira et al., 2021; Zolnikov & Ramirez Ortiz, 2018). Penggunaan merkuri di PESK sangat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan jika tidak dikelola dengan benar. Oleh karena itu, di Indonesia penggunaan merkuri khususnya di PESK telah dilarang (Peraturan Presiden RI no 21 tahun 2019). Merkuri dapat teremisikan ke udara saat proses pembakaran amalgam, sehingga paparan merkuri melalui pernapasan berpotensi membahayakan kesehatan. Merkuri juga dapat lepas ke lingkungan baik ke media air, sedimen, maupun tanah saat proses pencampuran dengan bijih emas dan pemerasan amalgam. Saat proses amalgamasi di dalam gelundung/*chanca*, merkuri yang lepas dan teremisikan ke lingkungan adalah sekitar 48,98%, terdiri dari 18,38% terlepas ke *tailing*, 29,07 teremisikan saat dekomposisi amalgam dan 1,53% teremisikan saat peleburan (Velásquez-López et al., 2010). Data lain menyebutkan bahwa lepasan merkuri tahunan dari kegiatan PESK diperkirakan antara 410 hingga 1400 ton (Esdaile & Chalker, 2018; R. A. Teixeira et al., 2021a). Remediasi lahan terkontaminasi merkuri menggunakan teknologi seperti desorpsi termal, solidifikasi/stabilisasi dan adsorpsi menggunakan karbon aktif dari segi biaya adalah mahal (L. Wang et al., 2020). Merkuri merupakan *transboundary pollutant* karena dapat menguap di temperatur ruang sehingga dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lain tergantung kondisi alam sekitar. Merkuri merupakan elemen yang persisten di lingkungan, namun dapat mengalami transformasi kimia melalui proses oksidasi, pelarutan, amalgamasi, presipitasi, adsorpsi dan aktivitas biologi yang mempengaruhi spesiasinya (Quintanilla-Villanueva et al., 2020).

Salah satu alternatif proses untuk mengganti amalgamasi adalah pelindian menggunakan bahan kimia sianida atau lebih dikenal dengan sianidasi. Pengolahan emas dengan sianidasi telah umum digunakan di perusahaan-perusahaan besar pertambangan emas. Namun dalam beberapa tahun terakhir, sianidasi menyebar dari industri pertambangan emas ke operasi skala pertambangan yang lebih kecil (Verbrugge, Lanzano, and Libassi 2021). Diyakini bahwa perolehan emas dengan sianidasi lebih besar dibandingkan dengan amalgamasi, tetapi proses sianidasi lebih kompleks dibandingkan proses amalgamasi. Perolehan emas dengan amalgamasi adalah lebih kecil dari 30% sementara dengan sianidasi bisa mencapai lebih besar dari 85% (Drace et al., 2016; Marshall et al., 2020). Amalgamasi berjalan optimal jika emas telah terliberasi dari batuan, sementara sianidasi dapat

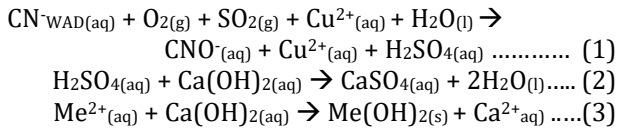
berjalan optimal bukan hanya ketika emas telah terliberasi dari batuan tetapi juga ketika emas terekspos dari batuan (Marshall et al., 2020; Verbrugge et al., 2021).

Pelindian bijih emas dengan proses sianidasi dapat menimbulkan *tailing* yang mengandung sianida dan logam berat. Konsentrasi sianida, baik sianida bebas (*free cyanide*), WAD sianida (*weak acid dissociable cyanide*) dan SAD sianida (*strong acid dissociable cyanide*), dan logam berat terlarut yang terdapat di dalam fasa cair *tailing* sangat tergantung pada komposisi bijih emas dan parameter proses sianidasi. Ditemukan bahwa perbedaan mineralogi dan spesi logam di dalam sampel bijih akan menyebabkan perbedaan pada perilaku sianidasi emas (Kim & Ghahreman, 2019). Sianida yang terkandung di dalam *tailing*, khususnya sianida bebas, sangat berbahaya bagi lingkungan karena memiliki efek racun yang sangat tinggi. Sianida adalah polutan yang sangat beracun dan berbahaya meskipun pada konsentrasi yang rendah (Farrokhi et al., 2013). Toksisitas sianida di dalam *tailing* sangat tergantung pada spesinya (Majalis et al., 2019). Toksisitas *free cyanide* > *weak acid dissociable* (WAD) *cyanide* > *strong acid dissociable* (SAD) *cyanide* (Mekuto et al., 2016). Demikian juga dengan logam berat seperti As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni dan Hg yang pada level tertentu mempunyai efek toksik dan karsinogenik (Chen et al., 2021).

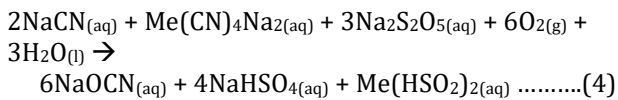
Metode pengolahan limbah sianida telah banyak dikaji oleh para peneliti. Metode-metode tersebut dapat dikelompokkan ke dalam penguraian secara alami, penambahan bahan kimia pada kondisi terkontrol, oksidasi biologi, perolehan kembali sianida, absorpsi dan elektrolitik (Kuyucak & Akcil, 2013). Saat ini pengolahan *tailing* sianidasi fokus pada dua aspek utama, yaitu: pertama, pengolahan yang berupaya untuk memperoleh kembali sianida, dan kedua, adalah pengolahan yang berupaya untuk menurunkan sifat bahaya/racun dari sianida, namun demikian aspek yang kedua menjadi lebih bernilai untuk diaplikasikan dalam praktek (W. da Wang et al., 2021). Upaya untuk menurunkan sifat racun sianida di dalam *tailing* pengolahan emas diantaranya adalah dengan proses biodegradasi dan biomineralisasi (W. da Wang et al., 2021), klorinasi alkali, oksidasi dengan hidrogen peroksida, oksidasi dengan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ -udara, hidrolisis di dalam autoklaf (Dong et al., 2021) dan dekomposisi termal (Brüger et al., 2018; Dong et al., 2021; DONG et al., 2021).

Pengolahan *tailing* sianidasi pada pertambangan emas skala kecil harus efektif, efisien dan mudah dilakukan. Efektif untuk menurunkan sifat racun dari sianida, efisien dari segi biaya pengolahan dan pengoperasiannya sederhana. Proses pengolahan dengan proses oksidasi-presipitasi menggunakan gas SO_2 dan O_2 yang bersumber dari $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ – udara yang dikatalisis oleh tembaga (II) dipilih karena mempunyai keunggulan, yaitu pengoperasiannya mudah karena dilakukan di dalam tangki reaktor pelindian yang mekanismenya

sama dengan proses sianidasi, efektif dalam menurunkan konsentrasi sianida dalam fasa cair maupun padatan *tailing*, waktu yang diperlukan relatif singkat dan secara ekonomi cukup efisien (Kuyucak & Akcil, 2013a; Majalis et al., 2019). Persamaan reaksi untuk proses oksidasi- presipitasi pada pengolahan sianida menggunakan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ -udara terkatalisis tembaga (II) disajikan di dalam reaksi (1), (2) dan (3) (Kuyucak & Akcil, 2013; Majalis et al., 2019).



Walaupun jumlah massa untuk penambahan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ dapat dikalkulasi sesuai dengan reaksi (4) (Aranguri LLerena & Reyes López, 2019), namun pada optimasi dan aplikasi di pertambangan emas skala kecil, rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ lebih sederhana.



Oksidasi sianida menjadi sianat dan presipitasi logam terlarut menjadi logam hidroksida akan optimum jika kondisi parameter proses seperti konsentrasi katalis Cu(II), pH, rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$, dan waktu dikondisikan dengan tepat sehingga konsentrasi sianida dan logam terlarut di dalam *tailing* akan menurun.

Tulisan ini bertujuan untuk mendeskripsikan hasil pengolahan *tailing* sianidasi bijih emas dari pertambangan emas skala kecil di Desa Kalirejo Kecamatan Kokap Kabupaten Kulonprogo Daerah Khusus Yogyakarta dengan menggunakan proses

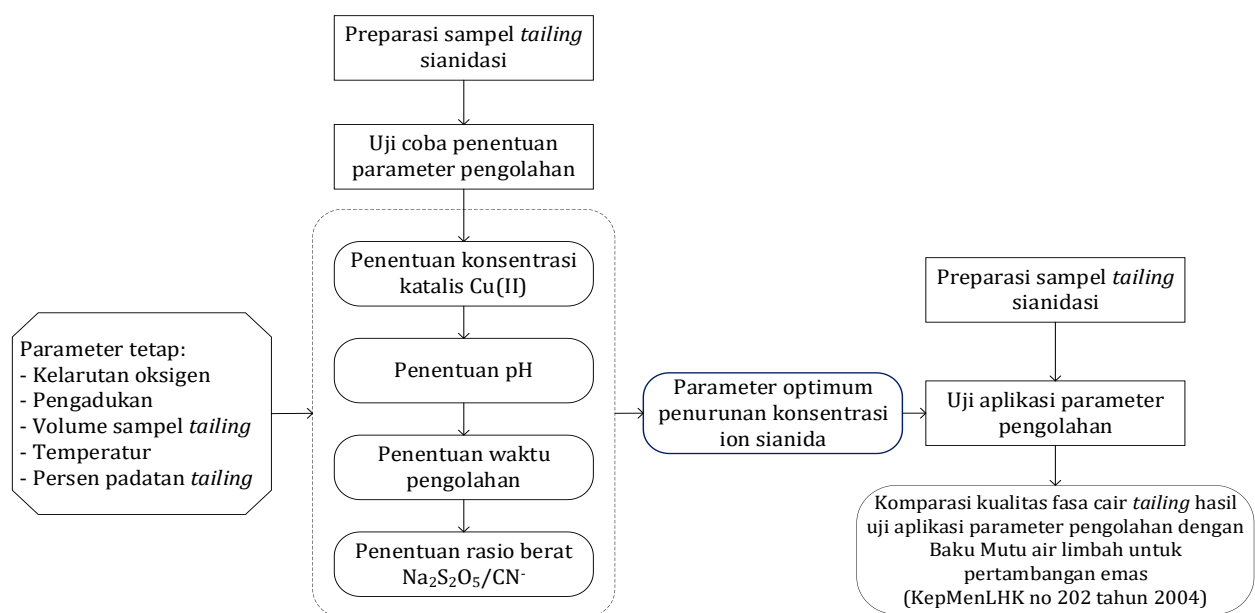
oksidasi-presipitasi menggunakan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ -udara dikatalisis dengan Cu(II) supaya diperoleh penurunan konsentrasi sianida dan logam berat terlarut di dalam *tailing* sehingga dapat memenuhi nilai baku mutu yang ditetapkan sesuai Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no 202 tahun 2004.

2. BAHAN DAN METODA

2.1. Alat dan Bahan

Peralatan penelitian ini terdiri dari alat untuk penentuan parameter pengolahan, alat uji aplikasi pengolahan dan alat analisis serta pengukuran. Alat-alat untuk penentuan parameter pengolahan yaitu reaktor gelas 4 liter, agitator IKA RW 20 dan dua buah aerator untuk suplay udara. Alat yang digunakan pada uji aplikasi yaitu reaktor SS316L 32 liter yang telah dilengkapi agitator dan aerator. Selanjutnya alat untuk pengukuran serta analisis terdiri dari alat pengukur waktu, timbangan analitis, alat pengukur pH dan kelarutan oksigen yaitu Lutron YK-2005WA, alat untuk preparasi sampel berupa sentrifuge, alat filtrasi serta peralatan gelas, alat untuk analisis konsentrasi sianida bebas yaitu spektrofotometer Hach DR2010, dan alat untuk menentukan kandungan logam dalam bijih dan fasa padat *tailing* yaitu *X-Ray Fluorescence* (XRF).

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu : bijih emas dan sisa hasil pengolahannya berupa *tailing* proses sianidasi bijih emas dari Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta, aquades, kertas saring whatman Ø47 mm 0,45 mikron, sodium metabisulfit ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) pro analis Merck, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pro analis Merck, NaOH pro analis Merck, asam sulfat pro analis Merck, dan *cyaniver 3*, *cyaniver 4*, serta *cyaniver 5* dari Hach.



Gambar 1. Bagan alir pengolahan *tailing* sianidasi dengan proses oksidasi-presipitasi

2.2. Prosedur Kerja dan Pengumpulan Data

Prosedur kerja dan pengumpulan data kegiatan pengolahan *tailing* sianidasi bijih emas dengan oksidasi-presipitasi pada kondisi *batch* dalam skala laboratorium meliputi prosedur uji coba penentuan parameter pengolahan dan prosedur uji aplikasi parameter pengolahan. Di samping itu disampaikan juga prosedur analisis sianida dan logam. Bagan alir kegiatan pengolahan *tailing* sianidasi dengan proses oksidasi-presipitasi disajikan di dalam Gambar 1.

2.2.1. Penentuan parameter pengolahan

Disiapkan 10 liter *tailing* sianidasi kemudian dihomogenkan dengan cara diaduk menggunakan agitator IKA RW 20 selama 0,5 jam pada kecepatan 500 rpm serta pH dikondisikan hingga 12 dengan menambahkan NaOH tetes demi tetes. *Tailing* hasil preparasi tersebut disampling dan dianalisis sianida bebas di dalamnya sebagai acuan untuk menentukan kebutuhan reagen saat penentuan parameter pengolahan. *Tailing* yang telah dipreparasi dan diketahui konsentrasi sianida bebas di dalamnya dimasukkan ke dalam reaktor gelas 4 liter yang telah dirangkai dengan agitator IKA RW 20 dan 2 buah aerator, selanjutnya dilakukan proses penentuan parameter pengolahan.

Parameter pengolahan *tailing* sianidasi bijih emas dari Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta yang akan ditentukan nilainya terdiri dari konsentrasi katalis Cu(II), pH pengolahan, rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ dan waktu pengolahan. Pada penentuan parameter pengolahan tersebut ada parameter-parameter yang dibuat tetap. Parameter-parameter tersebut yaitu : kelarutan oksigen awal yang dihasilkan oleh 2 buah aerator (sekitar 6 mg/L), volume *tailing* sebanyak 1 liter, persen solid *tailing* sekitar 30%, temperatur ruang dan pengadukkan pada kecepatan 500 rpm.

Penentuan konsentrasi katalis Cu(II) dilakukan dengan melakukan variasi jumlah katalis Cu(II) yang berasal dari $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ yaitu berturut-turut 0,0; 5; 10 dan 25 mg/L sementara parameter-parameter lain yang dibuat tetap yaitu pH awal 10, waktu pengolahan 60 menit, rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ sekitar 7,5 dan konsentrasi awal sianida bebas yang terukur. Penentuan parameter pH awal pengolahan dilakukan dengan memvariasikan pH *tailing* pada 9; 9,5; dan 10 dengan penambahan asam sulfat sementara parameter lainnya dibuat tetap yaitu rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ sekitar 7,5, waktu pengolahan 1 jam, konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, dan konsentrasi awal sianida bebas yang terukur. Penentuan waktu pengolahan dilakukan pada variasi 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; dan 4 jam sementara parameter lainnya dibuat tetap yaitu pH pengolahan 9, konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ sekitar 7,5 dan konsentrasi awal sianida bebas yang terukur. Penentuan rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ dilakukan pada variasi sekitar 15, 35 dan 75, sementara parameter lain yang tetap yaitu

pH pengolahan 9, waktu pengolahan 5 jam, konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L dan konsentrasi awal sianida bebas yang terukur.

2.2.2. Uji Aplikasi Pengolahan

Dimasukkan 20 liter *tailing* proses pelindian bijih emas dari Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo-DIY ke dalam reaktor SS316L 32 liter yang telah dilengkapi agitator dan aerator. *Tailing* diaduk menggunakan agitator supaya homogen selama 15 menit pada kecepatan pengadukkan 500 rpm serta dikondisikan pH pada 12 dengan penambahan NaOH. Selama proses homogenisasi dan pengkondisian pH *tailing*, aerator tidak dinyalakan. Selanjutnya sekitar 1000 mL *tailing* disampling, kemudian disentrifugasi dan disaring. Fasa cair *tailing* yang telah disaring dipreparasi untuk analisis konsentrasi sianida bebas, CN_{WAD} , sianida total dan logam berat. Sampel untuk kebutuhan analisis sianida bebas, CN_{WAD} dan sianida total dikondisikan pada pH > 12, sementara sampel untuk analisis logam berat dikondisikan pada pH < 2. Fasa padat *tailing* yang diperoleh dari proses sentrifugasi dikumpulkan untuk kebutuhan analisis sianida bebas, WAD sianida dan sianida total. Sebagian fasa padat *tailing* tersebut dicuci dengan aquades sambil dilakukan proses filtrasi hingga pH mendekati pH netral kemudian dikeringkan pada temperatur 105 °C selama 1,5 jam untuk kebutuhan analisis logam berat.

Parameter pengolahan yang digunakan pada uji aplikasi yaitu: pH pengolahan 9, rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ sekitar 45, waktu pengolahan 5 jam, konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, kelarutan oksigen aktual sebelum penambahan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ sekitar 6 mg/L, temperatur ruang, dan kecepatan pengadukan sekitar 500 rpm. Di akhir proses, *tailing* hasil pengolahan diambil sampelnya untuk kebutuhan analisis konsentrasi sianida bebas, CN_{WAD} , sianida total dan logam berat, baik pada fasa cair maupun fasa padat *tailing*. Preparasi sampel yang dilakukan pada *tailing* hasil pengolahan adalah sama seperti preparasi pada *tailing* sebelum proses pengolahan.

Kegiatan uji coba penentuan parameter pengolahan dan uji aplikasi pengolahan dilakukan di Laboratorium Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Mineral (PTPSM), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), PUSPIPTEK, Setu-Kota Tangerang Selatan.

2.2.3. Analisis sianida bebas dan logam

Analisis sianida bebas pada proses penentuan parameter pengolahan dan sebelum proses pengolahan pada uji aplikasi dilakukan dengan metode piridin pirazolon dengan reagen *cyaniver* 3, 4 dan 5 dan Hach. Selanjutnya konsentrasi sianida bebas diukur menggunakan instrumen HACH DR2010 pada panjang gelombang 520 nm. Analisis sianida bebas, WAD sianida, dan total sianida pada kegiatan uji aplikasi pengolahan dilakukan di Laboratorium ALS Indonesia.

Analisis logam dan sulfur pada bijih awal hasil sampling dilakukan dengan menggunakan *X-ray fluorescence (XRF) Rigaku*. Analisis logam pada fasa padat *tailing* sianidasi dilakukan menggunakan *X-ray fluorescence (XRF) Rigaku*, sementara analisis logam pada fasa cair *tailing* sianidasi sebelum dan setelah proses pengolahan dilakukan dengan menggunakan alat ICP-OES yang dilakukan di laboratorium ALS Indonesia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sumber tailing sianidasi

Sisa proses sianidasi bijih emas dari Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY adalah sumber *tailing* pada uji coba ini. Sianidasi merupakan proses pelindian atau pelarutan emas menggunakan bahan kimia natrium sianida (NaCN). Proses sianidasi tidak hanya melarutkan emas, tetapi sebagian logam-logam yang lain seperti Ag, Cu, Cd, Ni,

Zn, Hg dan Fe juga ikut terlarutkan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis komposisi bijih emas untuk bisa memprediksi kemungkinan senyawa kompleks logam sianida yang akan ada di dalam larutan sisa hasil pelindian. Secara umum senyawa kompleks logam-sianida yang terlarut di dalam air yaitu senyawa kompleks *weak metal-cyanide* atau *weak acid dissociable (WAD)* sianida seperti $Cu(CN)_3^{2-}$, $Zn(CN)_4^{2-}$, $Ni(CN)_4^{2-}$, $Cd(CN)_2^{2-}$, $Hg(CN)_2$ dan $Ag(CN)_2$, dan senyawa kompleks *strong metal-cyanide* atau *strong acid dissociable (SAD) cyanide* seperti $Fe(CN)_6^{4-}$, $Fe(CN)_6^{3-}$, $Co(CN)_6^{3-}$, $Pt(CN)_4^{2-}$ dan $Au(CN)_2$. Senyawa kompleks *weak metal-cyanide* akan mengalami disosiasi pada pH antara 4 – 6 untuk membentuk sianida bebas atau ion sianida, sementara itu senyawa kompleks *strong metal-cyanide* akan mengalami disosiasi pada pH < 2 atau melalui fotokatalis sinar UV untuk membentuk sianida bebas atau ion sianida (Dzombak et al., 2006)

Table 1. Kandungan logam pada bijih emas dari Desa Kalirejo, Kec Kokap, Kab Kulon Progo-DIY

No	Parameter	Satuan	Rerata
1	Magnesium (Mg)	%	1,63 ± 0,11
2	Aluminum (Al)	%	10,26 ± 0,50
3	Silika (Si)	%	49,38 ± 0,45
4	Sulfur (S)	%	2,32 ± 0,12
5	Besi (Fe)	%	3,80 ± 0,49
6	Kalium (K)	%	2,40 ± 0,23
7	Natrium (Na)	%	21,08 ± 1,58
8	Seng (Zn)	%	2,50 ± 0,36
9	Calcium (Ca)	%	5,08 ± 0,52
10	Mangan (Mn)	mg/kg	1.542 ± 175,89
11	Titanium (Ti)	mg/kg	2.282 ± 292,88
12	Kobal (Co)	mg/kg	243,60 ± 78,25
13	Nikel (Ni)	mg/kg	27,30 ± 2,01
14	Kromium (Cr)	mg/kg	40,08 ± 16,43
15	Arsenik (As)	mg/kg	142,60 ± 14,15
16	Timbal (Pb)	mg/kg	8.250 ± 1.537,87
17	Rubidium (Rb)	mg/kg	77,12 ± 11,24
18	Merkuri (Hg)	mg/kg	30,64 ± 6,66
19	Stronsium (Sr)	mg/kg	35,68 ± 5,39
20	Tembaga (Cu)	mg/kg	985,6 ± 157,60
21	Hafnium (Hf)	mg/kg	64,77 ± 13,33
22	Tantalum (Ta)	mg/kg	101,95 ± 12,18
23	Iridium (Ir)	mg/kg	127,60 ± 17,04
24	Platina (Pt)	mg/kg	45,72 ± 10,23
25	Timah (Sn)	mg/kg	87,53 ± 36,24
26	Yttrium (Y)	mg/kg	30,52 ± 5,74
27	Galium (Ga)	mg/kg	26,50 ± 6,90
28	Pospor (P)	mg/kg	418,30 ± 28,12
29	Torium (Th)	mg/kg	55,40 ± 13,60

Berdasarkan kandungan logam di dalam bijih sesuai Tabel 1 di atas, maka yang harus menjadi perhatian adalah keberadaan logam-logam seperti tembaga (Cu), kadmium (Cd), seng (Zn), timbal (Pb), Arsenik (As), Nikel (Ni), Kromium (Cr) dan merkuri (Hg). Keberadaan logam-logam tersebut dalam bijih dapat saja terlarutkan melalui pembentukan senyawa kompleks logam-sianida selama proses sianidasi. Logam-logam tersebut keberadaannya di dalam fasa cair *tailing* sisa pelindian harus berada di bawah ambang batas yang telah ditetapkan sesuai baku mutu air limbah untuk kegiatan pertambangan bijih emas sebelum di buang ke lingkungan atau badan air. Baku mutu air limbah untuk kegiatan

pertambangan bijih emas tersebut diatur di dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 202 tahun 2004.

3.2. Kandungan tailing sianidasi

Pelarutan emas dari bijih melalui sianidasi adalah proses hidrometalurgi yang telah teruji keefektifannya. Sejak lama dan hingga saat ini sianidasi masih diadopsi oleh perusahaan-perusahaan besar dalam memperoleh emas dari batuan atau bijih emas. Bahkan baru-baru ini sianidasi telah dicoba dan digunakan oleh pertambangan emas skala kecil sebagai pengganti amalgamasi di banyak lokasi dan terbukti

menghasilkan lebih banyak emas dibandingkan diaplikasikan dalam proses pelarutan emas dari bijih emas, maka semakin banyak *tailing* sianidasi yang di dalamnya mengandung sianida dan logam-logam berbahaya.

Peralihan proses pengolahan dari amalgamasi ke sianidasi jika ditinjau dari aspek lingkungan adalah sama-sama memiliki dampak negatif. Sianidasi menggunakan bahan kimia natrium sianida (NaCN) yang memiliki toksisitas sangat tinggi. Amalgamasi menggunakan bahan kimia merkuri (Hg) yang memiliki sifat persisten di lingkungan dan merupakan polutan lintas batas (*transboundary pollutant*). Namun, walaupun sama-sama memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, limbah sianidasi lebih mudah untuk diolah dan dikelola. Sianida di lingkungan dapat terurai dengan sendirinya secara alami (Dzombak et al., 2006; Johnson, 2015; Kuyucak & Akcil, 2013). Akan tetapi toksisitas sianida yang sangat tinggi mewajibkan proses pengolahan dilakukan segera sebelum membahayakan makhluk hidup yang ada di sekitar.

Tailing sianidasi bijih emas dari Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo-DIY

dengan amalgamasi. Semakin masif proses sianidasi dihasilkan dari proses pelarutan emas dari bijih menggunakan sianida yang dilakukan pada skala laboratorium. Kandungan sianida serta logam-logam di dalam *tailing*, baik fasa cair maupun fasa padat disajikan di dalam Tabel 2. Kandungan sianida bebas dan WAD sianida di dalam fasa cair *tailing* masih tinggi yaitu berturut-turut 49,5 ppm dan 138 mg/L. Jika *tailing* tersebut langsung dibuang ke lingkungan atau badan air, maka akan sangat membahayakan biota perairan, terlebih jika debitnya besar. Selain sianida, logam-logam seperti seng (Zn), tembaga (Cu) dan timbal (Pb) konsentrasinya berada di atas ambang batas yang ditetapkan di dalam baku mutu. Konsentrasi logam Zn, Cu dan Pb di dalam fasa cair *tailing* berturut-turut adalah 572, 154 dan 1,66 mg/L, sementara itu baku mutu untuk logam-logam tersebut berturut-turut yaitu 5, 2 dan 1 mg/L. Berdasarkan kandungan sianida dan logam-logam tersebut di dalam *tailing*, maka proses pengolahan diperlukan untuk menurunkan konsentrasi sianida dan logam-logam yang terlarut sehingga dapat memenuhi baku mutu air limbah yang telah ditetapkan.

Tabel 2. Kandungan sianida dan logam di dalam *tailing* sianidasi bijih emas Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulonprogo-DIY

No	Parameter	Hasil (ppm)	
		Matriks padat	Matriks cair
1	Tembaga (Cu)	1350	154
2	Kadmium (Cd)	-	<0,02
3	Seng (Zn)	31.075	572
4	Timbal (Pb)	10.900	1,66
5	Arsenik (As)	128	0,2
6	Nikel (Ni)	23	<0,02
7	Kromium (Cr)	41,7	<0,02
8	Merkuri (Hg)	36,1	<0,0005
9	Sianida bebas (f-CN ⁻)	13,4	49,5
10	Weak acid dissociable cyanide (WAD sianida)	63,3	138
11	Sianida total (t-CN ⁻)	70,7	158

3.3. Penentuan parameter pengolahan

Pengolahan *tailing* sianidasi adalah upaya untuk menurunkan toksisitas sianida dan menurunkan konsentrasi logam berat yang terlarut. Cara untuk menurunkan tingkat toksisitas adalah dengan mengurangi konsentrasi dan mengubahnya menjadi spesi lain yang memiliki toksisitas lebih rendah. Sementara itu konsentrasi logam berat yang terlarut dapat diturunkan salah satunya dengan proses pengendapan. Metode atau cara untuk merealisasikan upaya tersebut adalah proses oksidasi-presipitasi menggunakan gas sulfur (SO₂) yang bisa berasal dari Na₂S₂O₅ dan O₂ yang berasal dari udara yang dikatalisis oleh Cu(II).

Proses oksidasi-presipitasi pengolahan *tailing* sianidasi dipengaruhi oleh beberapa parameter pengolahan. Parameter pengolahan tersebut yaitu: konsentrasi katalis Cu(II), pH, rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻, kelarutan oksigen/*dissolved oxygen* (DO), waktu pengolahan, temperatur dan tumbukan antar partikel. Penentuan nilai parameter pengolahan *tailing* sianidasi bijih emas dari Desa

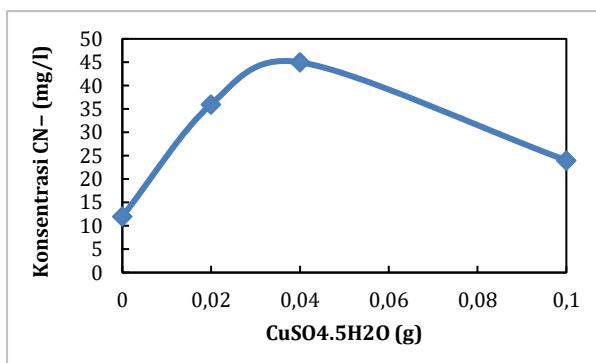
Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo-DIY telah dilakukan, yang meliputi konsentrasi Cu(II) yang berasal dari CuSO₄.5H₂O, pH, waktu pengolahan dan rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻. Parameter untuk kelarutan oksigen adalah nilai DO aktual yang disuplay aerator. Parameter DO, temperatur dan pengadukan ditetapkan secara berturut-turut yaitu sekitar 6 mg/L, temperatur ruang dan 500 rpm.

Penentuan nilai parameter konsentrasi katalis dilakukan dengan melakukan variasi jumlah CuSO₄.5H₂O sementara parameter lain dibuat tetap dengan tujuan untuk mendapatkan konsentrasi katalis yang optimum. Konsentrasi Cu(II) yang digunakan yaitu berturut-turut 0,0; 5; 10 dan 25 mg/L. Parameter-parameter lain yaitu konsentrasi ion sianida (CN⁻) di awal sekitar 27 mg/L, pH awal 10, waktu pengolahan 60 menit, dan rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻ sekitar 7,5. Hasil uji coba kegiatan penentuan konsentrasi katalis disajikan di dalam Gambar 3.



Gambar 2. Reaktor yang digunakan pada uji coba penentuan parameter dan uji aplikasi pengolahan limbah sianidasi

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tanpa penambahan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ konsentrasi ion sianida dapat diturunkan dari 27 mg/L menjadi 12 mg/L dan diperoleh persen penurunan konsentrasi ion sianida sebesar 55,56%. Sementara itu dengan penambahan konsentrasi Cu(II) 5, 10 dan 25 mg/L konsentrasi ion sianida bebas di dalam *tailing* malah meningkat secara berturut-turut yaitu menjadi 36, 45 dan 24 mg/L. Dengan hasil ini menunjukkan bahwa penambahan $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ sepertinya tidak berhasil mempercepat reaksi untuk menurunkan konsentrasi ion sianida. Hal ini mungkin saja karena konsentrasi tembaga yang terlarut di dalam *tailing* sudah cukup besar. Seperti yang telah disajikan di dalam Tabel 1, bahwa kandungan logam Cu dalam matriks cair *tailing* adalah 154 mg/L. Penambahan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tidak memberikan pengaruh terhadap penurunan konsentrasi ion sianida di dalam *tailing* karena tembaga yang terlarut di dalam matriks cair *tailing* sudah tinggi. Tembaga yang dibutuhkan sebagai katalis reaksi dalam menurunkan ion sianida bebas akan berkurang secara signifikan jika di dalam limbah yang akan diolah mengandung tembaga terlarut lebih dari 50 mg/L (Kuyucak & Akcil, 2013).

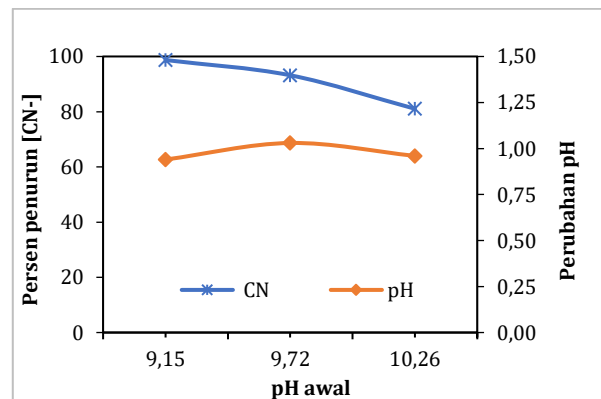


Gambar 3. Pengaruh penambahan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ terhadap perubahan konsentrasi ion sianida bebas

Namun demikian jika ditinjau lebih komprehensif, penambahan katalis Cu(II) kemungkinan dapat mempercepat terjadinya disosiasi WAD sianida menjadi sianida bebas. Hal ini terjadi pada penambahan Cu(II) 5; 10 dan 25 mg/L,

dimana ion sianida bebas konsentrasinya meningkat dari konsentrasi ion sianida bebas awal, dan waktu 60 menit kemungkinan belum cukup untuk mengubah ion sianida bebas menjadi ion sianat (CN^-). Sayangnya pada rentang waktu tersebut tidak dilakukan analisis perubahan konsentrasi WAD sianida, ion logam dan ion sianat. Peningkatan konsentrasi katalis Cu(II) , penambahan waktu pengolahan serta pengkondisian lainnya kemungkinan akan mampu mengubah WAD sianida menjadi ion sianida bebas dan selanjutnya mengubah ion sianida bebas menjadi ion sianat yang toksisitasnya seperseribu kali toksisitas ion sianida bebas.

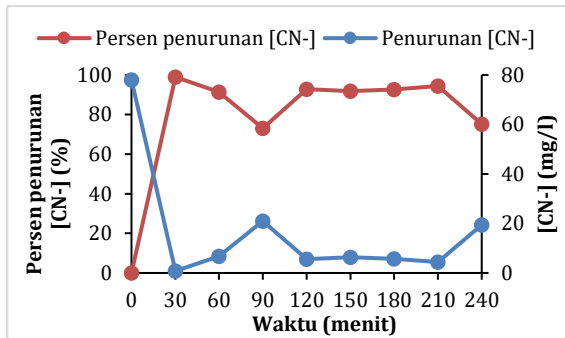
Penentuan nilai parameter pH pengolahan dilakukan pada variasi pH di sekitar 9; 9,5 dan 10. Tujuan dari uji coba penentuan nilai parameter pH pengolahan adalah untuk mendapatkan nilai pH optimum yang berpengaruh terhadap persen penurunan konsentrasi ion sianida di dalam *tailing*. Parameter lain yang ditetapkan dalam uji coba penentuan nilai parameter pH yaitu penambahan katalis Cu(II) 50 mg/L, waktu pengolahan 60 menit dan rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 7,5. Hasil uji coba menunjukkan bahwa pH awal pengolahan di sekitar 9 adalah kondisi pH yang mampu menurunkan konsentrasi ion sianida paling tinggi dan diperoleh persen penurunan sebesar 98,72%. Sementara itu pada pH di sekitar 9,5 dan 10 persen penurunan ion sianida berturut-turut 93,20% dan 81,06%. Hasil ini menunjukkan kecenderungan semakin tinggi pH, persen penurunan ion sianida semakin berkurang. Proses yang terjadi juga menunjukkan bahwa reaksi yang terjadi dapat menurunkan pH, dimana pH akhir pengolahan secara berturut-turut yaitu 8,21; 8,69 dan 9,3. Hasil dari uji coba penentuan nilai parameter pH disajikan di dalam Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh pH terhadap persen penurunan konsentrasi ion sianida bebas

Penentuan waktu pengolahan dilakukan untuk menentukan seberapa lama proses pengolahan dapat menurunkan konsentrasi ion sianida hingga pada kondisi dimana laju penurunannya mendekati stabil. Pengolahan dilakukan pada variasi waktu berturut-turut 0; 30; 60; 90; 120; 150; 180; 210 dan 240 menit. Sementara itu parameter lain yang ditetapkan yaitu: konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, pH awal 9,

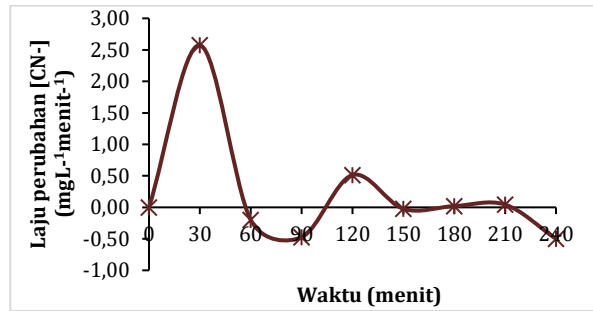
dan rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 7,5. Hasil yang diperoleh pada 30 menit pertama untuk persen penurunan konsentrasi ion sianida adalah sebesar 98,97%, atau konsentrasi ion sianida turun dari 78 mg/L menjadi 0,8 mg/L. Persen penurunan konsentrasi ion sianida pada 30 menit pertama adalah yang tertinggi, karena direntang waktu berikutnya terjadi peningkatan kembali konsentrasi ion sianida. Kondisi ini kemungkinan besar disebabkan oleh terjadinya disosiasi *weak acid dissociable cyanide* atau WAD sianida sehingga meregenerasi ion sianida yang baru. Disosiasi WAD sianida menjadi ion sianida di dalam larutan dipengaruhi oleh konstanta stabilitas, pH, temperatur, dan potensial redoks larutan (Dzombak et al., 2006). Pengaruh waktu terhadap perubahan konsentrasi ion sianida ditampilkan di dalam grafik pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh waktu terhadap perubahan konsentrasi ion sianida

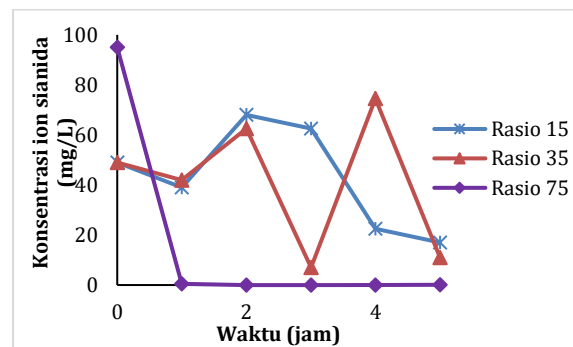
Laju perubahan konsentrasi ion sianida selama periode waktu yang ditetapkan seperti yang disajikan di dalam Gambar 6 belum menunjukkan kondisi stabil. Laju penurunan konsentrasi ion sianida pada 30 menit pertama adalah yang tertinggi yaitu $2,57 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$, diikuti secara berturut-turut pada periode waktu antara menit ke-90 hingga menit ke-120 yaitu $0,51 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$, periode waktu antara menit ke-180 hingga menit ke-210 yaitu $0,04 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$ dan pada periode waktu antara menit ke-150 hingga menit ke-180 yaitu $0,02 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$. Di periode waktu yang lain bukan laju penurunan yang diterjadi melainkan laju peningkatan konsentrasi ion sianida. Laju peningkatan ion sianida tertinggi terjadi pada periode waktu menit ke-210 hingga menit ke-240 yaitu $0,5 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$, diikuti berturut-turut pada periode waktu antara menit ke-60 hingga menit ke-90 yaitu $0,47 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$, periode waktu antara menit ke-30 hingga menit ke-60 yaitu $0,2 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$ dan pada periode waktu antara menit ke-120 hingga menit ke-150 yaitu $0,02 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$. Laju perubahan konsentrasi ion sianida yang tidak stabil tersebut kemungkinan disebabkan karena ketidakcukupan jumlah SO_2 dan oksigen untuk bisa mengoksidasi ion sianida bebas yang berasal dari *weak acid dissociable* (WAD) sianida. Maka uji coba selanjutnya adalah melakukan variasi rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$. Peningkatan nilai rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ artinya meningkatkan jumlah $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ yang digunakan sehingga kemungkinan besar akan meningkatkan jumlah gas SO_2 yang ada dalam *tailing*.

Spesi SO_2 dan oksigen yang terlarut mempunyai kemampuan mengoksidasi spesi CN^- menjadi OCN^- (Dzombak, et al., 2006; Kuyucak & Akcil, 2013).



Gambar 6. Laju perubahan konsentrasi ion sianida pada rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 7,5

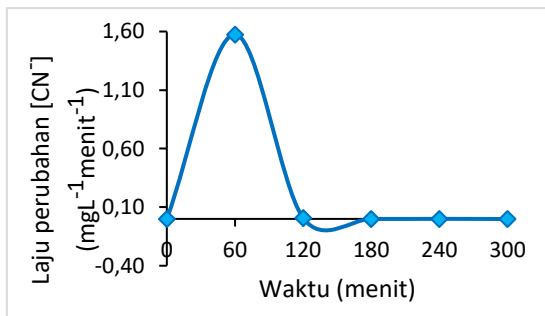
Penentuan nilai rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ bertujuan untuk dapat memperoleh penurunan konsentrasi ion sianida tertinggi serta memperoleh laju penurunan ion sianida yang mendekati kestabilan. Uji coba penentuan nilai rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ dilakukan dengan memvariasikan nilai rasio pada 15, 35 dan 75. Parameter lain yang ditetapkan dalam uji coba yaitu: konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, pH awal 9 dan waktu pengolahan sekitar 5 jam. Adapun konsentrasi awal ion sianida pada uji coba nilai rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 75 adalah 95 mg/L, sementara pada nilai rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 15 dan 35 adalah 49 mg/L.



Gambar 7. Grafik pengaruh rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ terhadap perubahan konsentrasi ion sianida

Hasil yang diperoleh seperti yang disajikan di dalam Gambar 7 menunjukkan bahwa konsentrasi ion sianida terendah yang dapat diperoleh dengan menggunakan nilai rasio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 75 adalah $0,006 \text{ mg/L}$, sementara dengan menggunakan nilai rasio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 15 dan 35 berturut-turut yaitu 17 mg/L dan 7 mg/L . Laju penurunan konsentrasi ion sianida yang relatif stabil diperoleh pada penggunaan nilai rasio berat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 75 sementara pada rasio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 15 dan 35 laju penurunan konsentrasi ion sianida belum stabil. Laju perubahan konsentrasi ion sianida pada penggunaan nilai rasio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5/\text{CN}^-$ 75 disajikan di dalam Gambar 8. Laju penurunan konsentrasi ion sianida tertinggi diperoleh pada waktu 60 menit pertama yaitu sekitar $1,58 \text{ mgL}^{-1}\text{menit}^{-1}$. Sementara itu dari menit ke-60 hingga menit ke-120 laju penurunannya menjadi

0,0078 mgL⁻¹menit⁻¹. Pada menit ke-120 hingga ion sianida sebesar 0,0002 mgL⁻¹menit⁻¹. Pada menit ke-180 hingga menit ke-240 terjadi lagi laju penurunan konsentrasi ion sianida sebesar 0,0005 mgL⁻¹menit⁻¹. Terakhir pada menit ke-240 hingga menit ke-300 terjadi lagi laju kenaikan konsentrasi ion sianida sebesar 0,0008 mgL⁻¹menit⁻¹. Dari menit ke-120 hingga menit ke-300 tersebut laju perubahan konsentrasi ion sianida, baik laju penurunan maupun laju kenaikan relatif tidak berubah secara signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai rasio Na₂S₂O₅/CN⁻ sebanding dengan meningkatnya penguraian sianida. Penelitian lain menunjukkan bahwa dengan meningkatkan rasio molar oksidator/CN⁻ akan sebanding dengan peningkatan penguraian dari sianida (L. A. C. Teixeira et al., 2013).



Gambar 8. Grafik laju perubahan konsentrasi ion sianida pada rasio berat Na₂S₂O₅/CN⁻ 75

3.4. Uji aplikasi pengolahan

Uji aplikasi pengolahan dilakukan pada *tailing* sianidasi dengan menerapkan parameter-parameter pengolahan yang telah diperoleh dari uji coba penentuan parameter pengolahan. Parameter-parameter pengolahan yang telah diperoleh yaitu: pH awal pengolahan sekitar 9, waktu pengolahan 300 menit, rasio Na₂S₂O₅/CN⁻ 75, dan konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L. Parameter lain seperti kelarutan oksigen awal, temperatur dan pengadukan ditetapkan secara berturut-turut yaitu sekitar 6 mg/L, temperatur ruang dan 500 rpm. Adapun

menit ke-180 terjadi laju kenaikan konsentrasi karakteristik *tailing* sianidasi yang digunakan dalam kegiatan uji aplikasi adalah seperti ditampilkan di dalam Tabel 2. Jumlah *tailing* yang digunakan dalam uji aplikasi pengolahan adalah sebanyak 20 liter dengan kandungan berat padatan sekitar 30%.

3.4.1. Perubahan konsentrasi sianida

Pengolahan *tailing* sianidasi dengan metode oksidasi-presipitasi dilakukan untuk dapat menurunkan konsentrasi ion sianida atau sianida bebas hingga diperoleh nilai di bawah ambang batas yang diatur oleh regulasi. Metode oksidasi-presipitasi selain mampu menurunkan konsentrasi sianida pada matriks cair *tailing*, juga mampu menurunkan konsentrasi sianida pada matriks padat *tailing*. Berdasarkan hasil uji coba aplikasi pengolahan, pada matriks padat *tailing* konsentrasi ion sianida turun dari 13,4 ppm menjadi 0,23 ppm atau 98,28%, konsentrasi WAD sianida turun dari 63,3 ppm menjadi 0,28 ppm atau 99,56% dan konsentrasi total sianida turun dari 70,7 ppm menjadi 0,34 ppm atau 99,52%. Sampling matriks fasa padat *tailing* dilakukan sebelum proses destruksi dan setelah 5 jam proses destruksi dilakukan atau pada akhir proses. Pada matriks cair *tailing*, konsentrasi ion sianida turun dari 49,5 mg/L menjadi 0,081 mg/L atau 99,84%, konsentrasi WAD sianida turun dari 138 mg/L menjadi 0,25 mg/L atau 99,82% dan total sianida turun dari 158 mg/L menjadi 0,47 mg/L atau 99,70%. Jika mengacu pada nilai Baku Mutu konsentrasi ion sianida sesuai Lampiran II Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no 202 tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Bijih Emas dan atau Tembaga yaitu 0,5 mg/L, maka konsentrasi sianida diakhir proses uji aplikasi sudah memenuhi nilai Baku Mutu. Perubahan konsentrasi sianida sebelum dan setelah proses pengolahan dengan metode oksidasi-presipitasi disajikan di dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perubahan sianida sebelum dan setelah proses pengolahan dengan metode oksidasi-presipitasi

No	Parameter	Satuan	Hasil			
			Sebelum		Setelah	
			Padat	Cair	Padat	Cair
1	Sianida bebas	ppm	13,4	49,5	0,23	0,081
2	WAD-sianida	ppm	63,3	138	0,28	0,25
3	Total sianida	ppm	70,7	158	0,34	0,47

3.4.2. Perubahan konsentrasi logam berat

Konsentrasi logam berat baik pada matriks fasa padat *tailing* maupun matriks fasa cair *tailing* mengalami perubahan seiring proses yang terjadi. Sebagian logam mengalami proses pelarutan membentuk senyawa kompleks dengan sianida ketika pelindian berlangsung. Logam-logam terlarut yang membentuk senyawa kompleks dengan sianida sebagian akan terserap ke dalam karbon aktif selama

proses adsorpsi. Selanjutnya pada proses pengolahan *tailing* dengan metode oksidasi-presipitasi, sebagian logam yang masih ada di dalam fasa cair *tailing* sianidasi akan terendapkan menjadi hidroksida logam (Kuyucak & Akcil, 2013). Perubahan konsentrasi logam pada matriks padat dan cair *tailing* sianidasi sebelum dan sesudah proses pengolahan dengan metode oksidasi-presipitasi disajikan di dalam Tabel 4.

Tabel 4. Perubahan konsentrasi logam berat pada matriks cair dan padat tailing sebelum dan sesudah proses pengolahan dengan metode oksidasi-presipitasi

No	Parameter	Satuan	Hasil			
			Sebelum		Setelah	
			Padat	Cair	Padat	Cair
1	As	ppm	128	0,2	134,5	0,08
2	Cd	ppm	-	<0,02	-	<0,02
3	Cr	ppm	41,7	<0,02	33,5	<0,02
4	Cu	ppm	1.350	154	1.525	0,36
5	Pb	ppm	10.900	1,66	11.025	0,54
6	Ni	ppm	23	<0,02	23	<0,02
7	Zn	ppm	31.075	572	31.275	0,36
8	Hg	ppm	36,1	<0,00005	39	<0,00005

Penurunan konsentrasi logam berat pada matriks cair *tailing* terjadi secara bervariasi. Ada yang signifikan, relatif kecil bahkan ada yang cenderung stabil. Logam berat yang konsentrasinya menurun secara signifikan adalah penurunan Cu dari 154 mg/L menjadi 0,36 mg/L atau 99,77% dan Zn dari 572 mg/L menjadi 0,36 mg/L atau 99,94%. Sementara itu, penurunan konsentrasi logam Pb dan As relatif kecil, untuk Pb penurunannya dari 1,66 mg/L menjadi 0,54 mg/L atau 67,47% dan untuk As penurunannya dari 0,2 menjadi 0,08 mg/L atau 60%.

Terakhir penurunan konsentrasi logam berat yang relatif konstan terjadi pada logam Cd, Cr, Ni dan Hg.

Secara keseluruhan konsentrasi logam berat dan konsentrasi ion sianida pada matriks cairan hasil destruksi telah memenuhi Baku Mutu (KepMENLHK no 202 tahun 2004). Di dalam aturan tersebut parameter logam berat yang ditetapkan adalah konsentrasi total logam terlarut As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg dan Zn. Sementara untuk sianida adalah konsentrasi sianida bebas.

Tabel 5. Hasil analisis fasa cair *tailing* sianidasi sebelum dan setelah proses pengolahan dan nilai baku mutu yang ditetapkan

No	Parameter	Satuan	Hasil analisis		Baku Mutu
			Sebelum	Setelah	
1	Tembaga (Cu)	mg/l	154	0,36	2
2	Kadmium (Cd)	mg/l	<0,02	<0,02	0,1
3	Seng (Zn)	mg/l	572	0,36	5
4	Timbal (Pb)	mg/l	1,66	0,54	1
5	Arsenik (As)	mg/l	0,2	0,08	0,5
6	Nikel (Ni)	mg/l	<0,02	<0,02	0,5
7	Kromium (Cr)	mg/l	<0,02	<0,02	1
8	Merkuri (Hg)	mg/l	<0,00005	<0,00005	0,005
9	Sianida (CN ⁻)	mg/l	49,5	0,081	0,5

Keterangan : Nilai Baku Mutu merujuk pada Lampiran II Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no 202 tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Bijih Emas dan atau Tembaga

4. KESIMPULAN

Pelindian bijih emas dengan sianida atau proses sianidasi dapat menimbulkan *tailing* yang mengandung sianida dan logam berat terlarut sehingga perlu pengolahan sebelum dilepas ke lingkungan. Metode oksidasi-presipitasi telah dilakukan dalam pengolahan *tailing* sianidasi bijih emas dari Desa Kalirejo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulonprogo-DIY dengan tahapan penentuan parameter proses dan uji aplikasi parameter proses. Uji aplikasi pengolahan menggunakan parameter proses yaitu: pH awal pengolahan sekitar 9, konsentrasi katalis Cu(II) 50 mg/L, waktu pengolahan sekitar 5 jam, rasio berat Na₂S₂O₅/CN sekitar 75, temperatur ruang, kelarutan oksigen sekitar 6 mg/L, dan kecepatan pengadukan sekitar 500 rpm mampu menghasilkan persen penurunan konsentrasi sianida bebas, WAD sianida dan total sianida pada fasa cair *tailing* secara berturut-turut yaitu 99,84%; 99,82% dan 99,70% dan pada fasa padat *tailing* secara berturut-turut

yaitu 98,28%; 99,56% dan 99,52%. Uji aplikasi pengolahan juga mampu menurunkan konsentrasi logam berat terlarut As, Cu, Pb dan Zn dalam fasa cair *tailing* dengan nilai persen penurunan secara berturut-turut yaitu 60%; 98,77%; 67,47% dan 99,94%. Analisis konsentrasi sianida bebas dan logam berat pada fasa cair *tailing* setelah proses pengolahan dengan metode oksidasi-presipitasi menunjukkan hasil telah memenuhi nilai Baku Mutu air limbah untuk kegiatan pertambangan bijih emas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Mineral, BRIN yang telah membiayai penelitian ini melalui pendanaan DIPA

DAFTAR PUSTAKA

Aranguri, L.G., & Reyes, L.I.A. (2019). Aranguri Llerena, G., & Reyes López, I.A. (2019). Cyanide Degradation from Mining Effluent

- Using Two Reagents: Sodium Metabisulphite and the Metabisulphite Mixture with Hydrogen Peroxide. *TECCIENCIA*, 13(25), 1-9. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2018.25.1>
- Brüger, A., Fafilek, G., Restrepo, B., O. J., & Rojas, M. L. (2018). On the volatilisation and decomposition of cyanide contaminations from gold mining. *Science of the Total Environment*, 627, 1167-1173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.320>
- Chen, Y.G., He, X.L.S., Huang, J.H., Luo, R., Ge, H.Z., Wołowicz, A., Wawrzkievicz, M., Gładysz, P. A., Li, B., Yu, Q.X., Kołodyńska, D., Lv, G.Y., & Chen, S.H. (2021). Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 219). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112336>
- Dong, K., Wei, X.F., Wang, W., Chang, Y., Feng, C., C. Lin, & GU, X. W. (2021). Efficient destruction of sodium cyanide by thermal decomposition with addition of ferric oxide. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 31(4), 1113-1126. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65565-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65565-6)
- Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., Lu, D., Gu, X., & Chen, C. (2021). The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 302). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126946>
- Drace, K., Kiefer, A.M., & Veiga, M.M. (2016). Cyanidation of Mercury-Contaminated Tailings: Potential Health Effects and Environmental Justice. *Current Environmental Health Reports*, 3(4), 443-449. <https://doi.org/10.1007/s40572-016-0113-0>
- 'Dzombak, D.A., 'Ghosh, R.S., & 'Wong, C.G. M. (2006). *Cyanide in Water and Soil Chemistry, Risk, and Management*. CRC Press.
- Esdaile, L.J., & Chalker, J.M. (2018). The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Chemistry - A European Journal*, 24(27), 6905-6916. <https://doi.org/10.1002/chem.201704840>
- Farrokhi, M., Yang, J.K., Lee, S.M., & Shirzad-Siboni, M. (2013). Effect of organic matter on cyanide removal by illuminated titanium dioxide or zinc oxide nanoparticles. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-23>
- Johnson, C.A. (2015). The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. In *Applied Geochemistry* (Vol. 57, pp. 194-205). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.05.023>
- Kim, R., & Ghahreman, A. (2019). The effect of ore mineralogy on the electrochemical gold dissolution behavior in various cyanide and oxygen concentrations; Effect of sulfidic ores containing heavy metals. *Hydrometallurgy*, 184, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.12.022>
- Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. In *Minerals Engineering* (Vols. 50-51, pp. 13-29). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>
- Majalis, A.N., Lusiani, S., & Novitasari, Y. (2019). Proses untuk Menurunkan Konsentrasi Sianida Bebas dalam Air Limbah Pertambangan Emas Skala Kecil. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20, 73-82.
- Marshall, B.G., Veiga, M.M., da Silva, H.A.M., & Guimarães, J.R.D. (2020). Cyanide Contamination of the Puyango-Tumbes River Caused by Artisanal Gold Mining in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Current Environmental Health Reports*, 7(3), 303-310. <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00276-3>
- Mekuto, L., Ntwampe, S.K.O., & Akcil, A. (2016). An integrated biological approach for treatment of cyanidation wastewater. In *Science of the Total Environment* (Vol. 571, pp. 711-720). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.040>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2004). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.202 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Limbah untuk Usaha dan atau Kegiatan Pertambangan Bijih Emas dan/atau Tembaga*.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2019). *Peraturan Presiden Republik Indonesia No.21 Tahun 2019 Tentang Rencana Aksi Nasional Pengurangan Dan Penghapusan Merkuri (RAN PPM)*, Jakarta (Sekretariat Negara).
- Quintanilla-Villanueva, G.E., Villanueva-Rodríguez, M., Guzmán-Mar, J.L., Torres-Gaytan, D.E., Hernández-Ramírez, A., Orozco, R.G., & Hinojosa-Reyes, L. (2020). Mobility and speciation of mercury in soils from a mining zone in Villa Hidalgo, SLP, Mexico: A preliminary risk assessment. *Applied*

- Geochemistry*, 122 (March).
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104746>
- Teixeira, L.A.C., Arellano, M.T.C., Marquez Sarmiento, C., Yokoyama, L., & Araujo, F. V. D. F. (2013). Oxidation of cyanide in water by singlet oxygen generated by the reaction between hydrogen peroxide and hypochlorite. *Minerals Engineering*, 50–51, 57–63.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.007>
- Teixeira, R.A., Pereira, W.V. da S., Souza, E.S. de, Ramos, S.J., Dias, Y.N., Lima, M.W. de, de Souza Neto, H.F., Oliveira, E.S. de, & Fernandes, A.R. (2021). Artisanal gold mining in the eastern Amazon: Environmental and human health risks of mercury from different mining methods. *Chemosphere*, 284(February), 131220.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131220>
- Velásquez-López, P.C., Veiga, M.M., & Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 226–232.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.010>
- Verbrugge, B., Lanzano, C., & Libassi, M. (2021). The cyanide revolution: Efficiency gains and exclusion in artisanal- and small-scale gold mining. *Geoforum*, 126, 267–276.
<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.07.030>
- Wang, W.D., Duan, Y.T., Wu, Y., Ming, H.Y., Gao, F.W., Wang, Z., & Zheng, C. li. (2021). Harmless treatment of cyanide tailings by a bifunctional strain JK-1 based on biodegradation and biomineralization. *Journal of Cleaner Production*, 313.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127757>
- Wang, L., Hou, D., Cao, Y., Ok, Y.S., Tack, F.M.G., Rinklebe, J., & O'Connor, D. (2020). Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. In *Environment International* (Vol. 134). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>
- Zolnikov, T.R., & Ramirez, O.D. (2018). A systematic review on the management and treatment of mercury in artisanal gold mining. In *Science of the Total Environment* (Vol. 633, pp. 816–824). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.241>