

**REMEDIASI ELEKTROKINETIK MENGGUNAKAN
ELEKTRODA 2-D HEXAGONAL PADA TANAH LIMBAH
PERTAMBANGAN EMAS YANG MENGANDUNG TEMBAGA (Cu)
DAN MERKURI (Hg) DI KOKAP KULONPROGO YOGYAKARTA**
(Electro-Kinetics Remediation 2-D Hexagonal Electrode in the Gold Mining Tailing
Containing Copper and Mercury at Kokap Kulonprogo Yogyakarta)

Sismanto¹, Luqman Hakim², Sherly Suharto² dan Nur Evi Oktavianti²

¹Laboratorium Geofisika, FMIPA, UGM
email: sismanto@ugm.ac.id

²Laboratorium Teknik Lingkungan, Fak. T. Sipil, UII, Yogyakarta

ABSTRAK

Penambang emas rakyat sering menggunakan proses amalgamasi untuk mengekstraksi emas pada penambangan emas Kokap, Kulonprogo Yogyakarta. Alat yang sering digunakan untuk proses amalgamasi ini umumnya berbentuk drum dan sering dinamakan gelundung. Untuk mendapatkan emas murni, bijih emas yang masih mengandung logam Cu dan lainnya dipanaskan, hasilnya disebut bullion. Di dalam proses pemurnian emas akan diperoleh limbah yang mengandung logam berat seperti Cu, Hg, Cd dan lainnya. Untuk memulihkan limbah dari polutan Cu dan Hg, kami menggunakan metode elektrokinetik dengan konfigurasi 2D hexagonal, tegangan DC 40 volt and arus 0,2 ampere selama 15 jam. Setiap 3 jam limbah tersebut diambil untuk dianalisis kandungan Cu dan Hg dengan metode AAS. Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat penurunan konsentrasi Cu yang signifikan mencapai 61 % dan Hg mencapai 36 %.

Kata kunci : Elektrokinetik, Pemulihan, Penambangan emas, pencemar Cu dan Hg

ABSTRACT

Amalgamation is used to extract gold in a gold mining at Kokap, Kulonprogo, Yogyakarta by local miners. The equipment of this process is a drum in certain shape or *gelundung*. To get pure gold, the gold ores that also contain Cu and other metals are heated and the result of this process is called bullion. In the process of purification it will produce a tailing which still contains heavy metals such as Cu, Hg, Cd, etc. To remove Cu and Hg pollutants in the tailing, we used electro-kinetics method by 2D hexagonal configuration with direct current of 40 volt and 0.2 ampere with 15 hours of operation. Every 3 hours the tailing is sampled for analyses of Cu by AAS method. The results show that there is significant decrease in Cu concentration by 61 % and Hg by 36 %.

Keywords: Electro-kinetic process, Remediation, Gold mining, Cu and Hg pollutants

Makalah diterima 1 Februari 2007

1. PENDAHULUAN

Usaha pertambangan emas rakyat di Kokap Kulonprogo dilakukan secara amalgamasi yaitu dengan menggunakan merkuri Hg sebagai media untuk mengikat emas dan menghasilkan limbah Hg dan Cu^{2+} dan logam berat lainnya dari hasil pemurnian emas. Pada proses pemurnian emas dihasilkan limbah cair, limbah cair ini berasal dari proses peleburan dan pemasakan. Pada proses peleburan, emas dan perak dituang di air agar terbentuk emas berupa kristalan. Emas yang berupa kristalan dimasak dengan penambahan HCl yang akan menyebabkan emas mengendap, tembaga dan perak terpisah dan larut bersama air. Limbah cair yang dihasilkan dibuang pada bak penampungan yang kemudian dialirkan ke sungai sehingga berpotensi akan mencemari tanah dan air.

Untuk menekan jumlah limbah yang berasal dari usaha pertambangan tersebut, maka perlu dilakukan perbaikan sistem pengelolaan yang dapat menekan jumlah limbah yang dihasilkan akibat proses pemurnian emas. Untuk mencapai hal tersebut, maka digunakan remediasi elektrokinetik untuk penanganan limbah Cu dan Hg.

Geologi Daerah Kokap Kulon Progo

Daerah Kulon Progo dibentuk oleh batuan berumur Tersier sampai Kuartar, diantaranya Formasi Namggulan, Formasi Kebobotak, Formasi Jonggrangan dan Formasi Sentolo, serta batuan intrusi intermediet-felsik. Formasi Nanggulan (Eosen-Oligosen) disusun oleh batupasir bersisipan lignit, napal pasir, batulempung limonitik, sisipan maldan batu gamping, batupasir dan tuf. Formasi Kebobotak (Oligosen-Miosen) berupa breksi andesit, tuf, tuf lapili, aglomerat dan lava andesit. Formasi jonggrangan (Miosen) disusun oleh konglomerat, napal tufan, batupasir gampingan bersisipan lignit, batugamping berlapis dan batugamping koral. Formasi Sentolo (Miosen-Pliosen) disusun oleh batugamping dan batupasir napalan. Sedangkan batuan intrusi, yang menerobos Formasi Kebobotak (Miosen), berkomposisi andesit hipersten, andesit sugit, trakiandesit sampai dasit (Raharjo, dkk., 1995). Daerah Kokap didominasi oleh batuan andesit porfiri dan sedikit endapan aluvial kuartar. Sebagian

andesit mengalami breksiasi, silisifikasi dan ubahan propilitik sampai filik. Beberapa urat kuarsa yang mengisi bidang rekahan dan zona geser menunjukkan mineralisasi emas berasosiasi dengan pirit dan sulfida logam dasar. Struktur geologi lokal dijumpai berupa kekar dan breksiasi pada batuan andesit. Sesar normal minor berarah Barat Laut-Tenggara dan Timur Laut-Barat Daya juga dijumpai di daerah Kokap dan sekitarnya. Mineralisasi emas di daerah Kokap tersebar tidak merata dalam urat kuarsa mengandung sulfida, dan kadang-kadang berasosiasi dengan lempung ubahan filik-argilik yang penyebarannya dikontrol oleh bidang-bidang rekahan membentuk stockwork veins. Urat kuarsa dengan tebal bervariasi < 1cm – 50cm, membentuk jalur mineralisasi yang umumnya berarah $N60^{\circ}E - N110^{\circ}E$ dengan kemiringan $70^{\circ} - 80^{\circ}$. Di Beberapa lokasi, mineralisasi emas terdapat dalam urat kuarsa halus (1-50) mm membentuk stockwork veinlets pada batuan andesit terubah. Emas dan perak terdistribusi secara acak dalam urat kuarsa dengan kadar (1-13,8) ppm Au dan (5,4-63,2) ppm Ag (Gunawan, dkk., 2001). Urat-urat kuarsa mengandung emas berkadar tinggi dijumpai di Dusun Sangon, Plampangan, Gabus dan Gunung Kukusan.

Tembaga (Cu)

Unsur tembaga di alam dapat ditemukan dalam bentuk logam bebas, akan tetapi lebih banyak ditemukan dalam bentuk persenyawaan atau sebagai senyawa padat dalam bentuk mineral. Selain dari bentuk-bentuk mineral tersebut, logam tembaga banyak ditemukan dalam bentuk terosidasi seperti bijih (Palar, 1994). Secara alamiah Cu dapat masuk kedalam suatu tatanan lingkungan sebagai akibat dari peristiwa alam. Unsur ini dapat bersumber dari peristiwa pengikisan (erosi) dan batuan mineral. Sumber lain adalah debu-debu atau partikulat-partikulat Cu yang ada dalam lapisan udara yang dibawa turun oleh air hujan. Tembaga mempunyai sifat yang elektropositif (mulia), tembaga mudah diendapkan oleh logam yang daya gerak listriknya lebih tinggi. Tembaga

murni berwarna merah dan bersifat ulet, karena itu dapat dikerjakan dengan baik secara penempaan, pengelasan dan sebagainya. Tembaga dalam perdagangan umumnya kurang murni dan kurang padat, karena berat jenisnya rata-rata hanya 8,2. Sebagai logam berat, Tembaga (Cu) berbeda dengan logam-logam berat lainnya seperti Hg, Cd, Cr. Logam berat Cu digolongkan kedalam logam berat dipentingkan atau logam berat esensial artinya meskipun Cu merupakan logam berat beracun unsur logam ini sangat dibutuhkan tubuh meski dalam jumlah yang sedikit. Karena itu Cu juga termasuk kedalam logam-logam esensial bagi manusia seperti besi (Fe). Toksisitas yang dimiliki oleh Cu baru akan bekerja dan memperlihatkan pengaruhnya bila logam ini telah masuk kedalam tubuh organisme dalam jumlah besar atau melebihi toleransi organisme terkait (Palar, 1994).

Merkuri (Hg)

Merkuri, ditulis dengan simbol kimia (Hg) atau hydragyum yang berarti "perak cair" (liquid silver) adalah jenis logam sangat berat yang berbentuk cair pada temperatur kamar, berwarna putih keperakan, memiliki sifat sebagai berikut (Pallar, 1994):

1. Berwujud cair pada temperatur kamar. Zat cair ini tidak sangat mudah menguap (tekanan gas/uapnya adalah 0,0018 mm Hg pada 25°C)
2. Terjadi pemuaiian secara menyeluruh pada temperatur 396°C
3. Merupakan logam yang paling mudah menguap
4. Logam yang sangat baik untuk menghantar listrik
5. Dapat melarutkan berbagai logam untuk membentuk alloy yang disebut juga amalgam
6. Merupakan unsur yang sangat beracun bagi hewan dan manusia.

Sifat penting merkuri lainnya adalah kemampuannya untuk melarutkan logam lain dan membentuk logam paduan (alloy) yang dikenal sebagai amalgam. Emas dan perak adalah logam yang dapat terlarut dengan merkuri, sehingga merkuri dipakai untuk mengikat emas dalam proses pengolahan bijih sulfida mengandung emas melalui proses amalgamasi. Amalgamasi merkuri-emas dilakukan dengan memanaskannya sehingga merkuri menguap meninggalkan logam emas dan campurannya. Merkuri sangat jarang

dijumpai sebagai logam murni (native mercury) di alam dan biasanya membentuk mineral sinabar (cinnabar) atau merkuri sulfida (HgS). Merkuri sulfida terbentuk dari larutan hidrothermal pada temperatur rendah dengan cara pengisian rongga (cavity filling) dan penggantian (replacement). Merkuri sering berasosiasi dengan endapan logam sulfida lainnya, diantaranya Au, Ag, Sb, Cu, Pb dan Zn sehingga di daerah mineralisasi emas tipe urat biasanya kandungan merkuri dan beberapa logam berat lainnya cukup tinggi.

Tembaga dan Merkuri pada Lingkungan Penambangan

Tembaga merupakan zat yang sering terdapat pada lingkungan yang alami. Manusia banyak menggunakan tembaga (Cu). Produksi dari tembaga yang berlebih akan meninggalkan bekas dan kualitas dari tembaga pada lingkungan akan meluas. Produksi tembaga masih meningkat di dunia, ini berarti bahwa masih banyak tembaga yang terdapat pada lingkungan sungai yang menghasilkan lumpur pada pinggirnya berasal dari kontaminasi tembaga, dan pembuangan dari limbah yang mengandung tembaga.

Merkuri digunakan untuk mengikat emas dan perak dengan cara amalgamasi. Merkuri (Hg) adalah salah satu faktor penentu dalam proses amalgamasi. Merkuri yang digunakan harus berkadar tinggi atau bersih dan dalam keadaan masih baru (fresh), sehingga merkuri tersebut mempunyai daya tangkap emas dan perak dengan baik. Jumlah merkuri tidak perlu banyak, tetapi disesuaikan dengan kadar emasnya. Hampir semua merkuri diproduksi dengan cara pembakaran merkuri sulfida (HgS) di udara, dengan persamaan reaksi sebagai, $\text{HgS} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Hg} + \text{SO}_2$. Merkuri dilepaskan sebagai uap, yang kemudian mengalami kondensasi, sedangkan gas-gas lainnya mungkin terlepas di atmosfer atau dikumpulkan. Merkuri di alam terdapat dalam berbagai bentuk seperti Hg^{++} , HgCl_2 , HgO , fenil merkuri asetat, metil

merkuri, etil merkuri dan lainnya (Palar, 1994).

Dampak Tembaga dan Merkuri terhadap lingkungan dan kesehatan

Konsentrasi Cu yang berada dalam kisaran (2,5-3,0) ppm dalam badan perairan akan membunuh ikan-ikan (Palar, 1994). Bahkan dengan kadar tembaga (0,25-1) mg/l dalam perairan sudah dapat membunuh ikan karena keracunan. Sesuai dengan sifat sebagai logam beracun, Cu dapat mengakibatkan keracunan secara akut dan kronis. Keracunan akut dan kronis ini terjadinya ditentukan oleh besarnya dosis yang masuk dan kemampuan organisme untuk menetralkan dosis tersebut. Sebagai logam berat Hg termasuk logam yang mempunyai daya racun tinggi, walaupun mekanisme keracunan merkuri di dalam tubuh belum diketahui dengan jelas. WHO menetapkan batasan maksimum kandungan merkuri yaitu 0.0001 ppm untuk di air. Orang yang keracunan merkuri, dalam waktu singkat bisa menyebabkan berbagai gangguan. Mulai dari rusaknya keseimbangan, tidak bisa berkonsentrasi, tuli, dan berbagai gangguan lainnya seperti yang terjadi pada kasus Minamata. Kerusakan tubuh yang disebabkan oleh merkuri pada umumnya bersifat permanen

Dari proses pengolahan emas terlihat adanya merkuri (Hg) sebagai pemisah bijih emas dengan pengotor yang terdapat dalam batu-batuan emas. Kemungkinan merkuri yang terdapat dalam air limbah sebagai hasil pelarutan merkuri yang berada dalam lumpur yang karena adanya oksigen maka terjadi reaksi oksidasi HgO menjadi Hg⁺⁺ yang larut dalam air. Sesuai dengan SK Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup No. KEP-02/MENKLH/I/1988, nilai ambang batas air yang dapat diminum tidak boleh mengandung merkuri/air raksa lebih dari 0,001 mg/l, sedangkan standar baku mutu udara emisi tidak boleh mengandung uap air raksa lebih dari 0,02 gm/Nm³. Demikian pula pada tembaga yang terdapat pada lingkungan, secara alami Cu masuk ke dalam badan perairan sebagai akibat dari peristiwa erosi atau pengikisan batuan mineral, debu yang tertiuap angin dan melalui persenyawaan Cu di atmosfer yang dibawa turun oleh air hujan. Sedangkan dari kegiatan manusia berasal dari penambangan, produksi logam, produksi kayu,

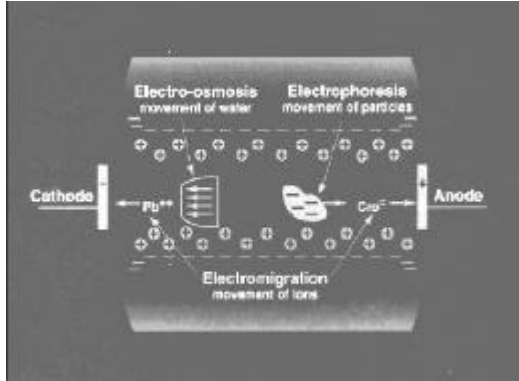
produksi fosfat yang larut pada badan perairan.

2. METODE REMEDIASI ELEKTROKINETIK

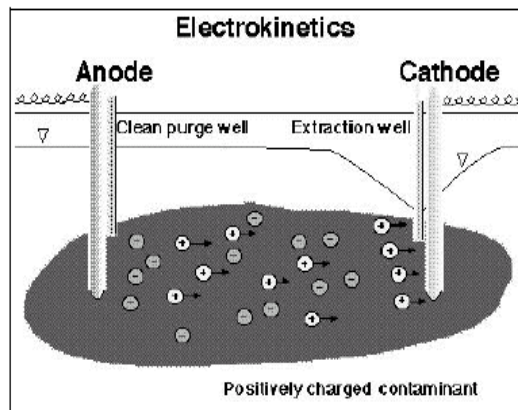
Remediasi elektrokinetik merupakan teknologi pemulihan tanah terkontaminasi logam berat dan senyawa-senyawa organik melalui proses secara in-situ dengan menggunakan tegangan listrik rendah dan arus DC konstan. Elektroda diletakkan pada tanah dengan susunan aliran terbuka. Akibat arus DC yang masuk akan terjadi perubahan fisis dan kimia serta hidrologi dalam tanah yang menunjukkan adanya bermacam-macam perpindahan ionik dengan fenomena konduksi berpasangan dan tidak berpasangan dalam media berpori. Perpindahan ionik ini melalui penyerapan, penguapan dan reaksi peruraian yang merupakan mekanisme dasar dari remediasi elektrokinetik (Pamukcu, 1994).

Elektrokinetik merupakan suatu proses yang sangat sederhana. Dua elektroda diletakkan di dalam tanah dengan kuat arus searah (*direct current*) yang dilewatkan di antara keduanya sehingga elektroda tersebut dibedakan menjadi katoda dan anoda. Arus searah ini melewati tanah yang menghasilkan area kecil dimana ion-ion dapat berpindah (gambar 1). Pada gambar 1, penginjeksian arus melalui elektroda anoda (sumber injeksi) dan katoda (elektroda ekstraksi). Kontaminan bermuatan positif akan cenderung untuk bergerak ke katoda. Sumber injeksi membantu dalam pergerakan ion-ion dan sumber ekstraksi untuk menghilangkan kontaminan bila mencapai elektroda. Gerakan ion menuju satu elektroda lainnya tanpa perpindahan secara konveksi disebut elektromigrasi. Tetapi elektromigrasi hanya mampu menghilangkan kontaminan ionik seperti ion-ion logam, asam organik terlarut dan basa. Elektromigrasi adalah kunci dari mekanisme dalam menghilangkan kontaminan ion organik terutama ion-ion logam (Kim, 1998). Sedangkan gerakan air yang terjadi dalam tanah disebut dengan elektroosmosis yang juga

mencakup elektroforosis, yaitu gerakan partikel bermuatan atau koloid dalam medan listrik. Gerakan air di dalam tanah ini membawa ion-ion logam yang selanjutnya mengurangi kadar kontaminan.



a.



b.

Gambar 1 a dan b. Ilustrasi sebuah medan elektrokinetik dapat mengurai dan memindahkan ion-ion dengan berbagai mekanisme fisis dasar (Pamukcu, 1994).

Terjadinya proses elektromigrasi dan elektroosmosis untuk memindahkan kontaminan pada salah satu elektroda, berkaitan dengan kation pada anoda atau anion pada katoda sehingga dapat mengurangi kontaminan menuju elektroda dari beban yang berlawanan. Ini merupakan cara yang sempurna untuk menimbulkan terjadinya reaksi kimia yang akan mendetoksifikasi kontaminan. Ukuran tanah yang berbutir halus menjadi pertimbangan khusus dalam remediasi kontaminasi air tanah. Sulitnya mengurangi kontaminan pada tanah berbutir halus mengakibatkan dapat terjadinya bioremediasi. Menurut sifat dari kontaminan

yang dapat berpindah dari satu area ke area yang lain, elektrokinetik merupakan solusi yang baik untuk menangani masalah tersebut. Tetapi disamping itu, elektrokinetik memiliki dampak negatif dari proses pembersihan kontaminan. Jika terlalu banyak ion lain dalam tanah, maka dapat mengurangi target kontaminan yang akan diangkat.

Desain Reaktor

Reaktor adalah wadah tempat proses remediasi, dan konfigurasi elektroda 2D Hexagonal diilustrasikan pada gambar 3. Elektroda yang digunakan adalah batang Carbon dari baterai bekas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

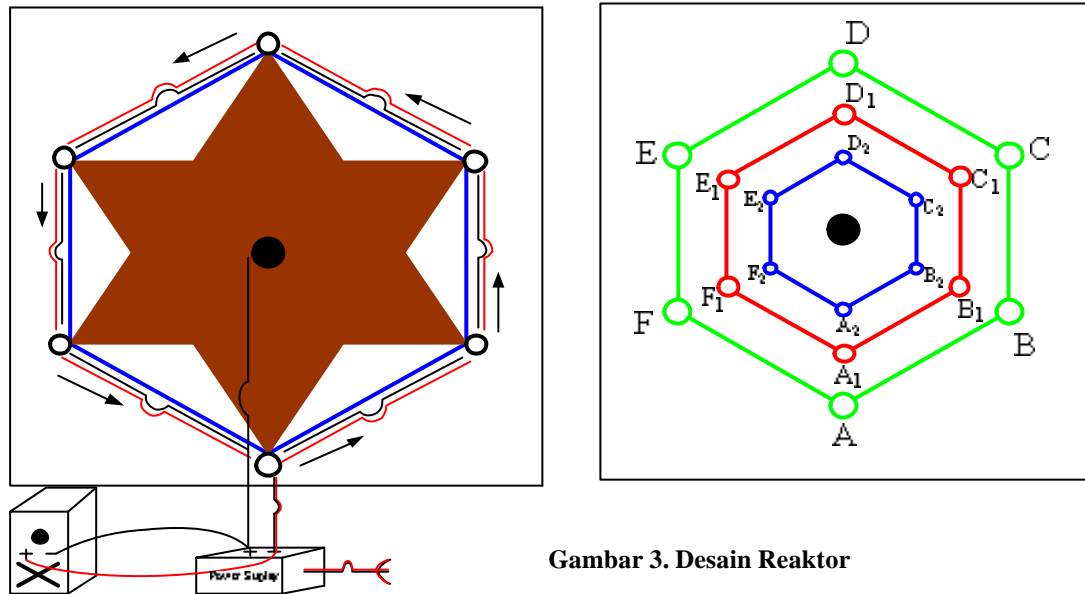
Konsentrasi Cu

Dengan menggunakan metode AAS, diperoleh konsentrasi awal Cu sebesar 6,0246 mg/l dan konsentrasi akhir 0,1535 mg/l, sedangkan untuk konsentrasi Hg awal adalah 0,0561 ppm. Pada proses remediasi ini, diharapkan memperoleh konsentrasi yang semakin menurun pada masing-masing area setiap 3 jam selama 15 jam. Tetapi hasil yang didapat berfluktuasi, bahkan nilai konsentrasi awal Hg dianggap tidak mewakili sampel, karena terlalu kecil terhadap sampel berikutnya yang telah diremediasi beberapa jam. Hal ini disebabkan karena pengadukan ketika di dalam reaktor tidak merata sehingga kondisi tanah tidak homogen.

Pengukuran konsentrasi Cu dan Hg pada masing-masing area setiap 3 jam disajikan pada gambar 4. Pada Gambar 4, terlihat peningkatan konsentrasi Cu dan Hg pada area 3. Area 3 merupakan area terdekat dengan katoda. Pada daerah sekitar katoda terjadi proses reduksi sehingga ion-ion logam tertarik pada katoda. Logam yang terbentuk itu kemudian diendapkan pada permukaan batang katoda. Batang katoda ini terselimuti oleh logam Cu^{2+} dan logam lain yang terdapat pada limbah sehingga mengakibatkan konsentrasi yang

terkandung semakin besar. Selain itu, area sekitar katoda juga terjadi proses elektroosmotik dan elektroosmosis. Aliran elektroosmotik disebabkan oleh perpindahan ion-ion secara paralel ke permukaan partikel termasuk ke elektroda selama terjadinya perpindahan secara melekat (Eykholt, 1992). Sedangkan proses elektroosmosis yang terjadi sangat besar, karena jumlah perpindahan ion

ke arah elektroda dan ke media (tanah) sangat tinggi. Hal ini memberikan efek yang sangat penting pada proses pembersihan tanah terhadap kontaminan (Eykholt dan Daniel, 1994). Penggambaran kosentrasi terhadap jarak pada setiap 3 jam diberikan pada gambar 5.



Gambar 3. Desain Reaktor

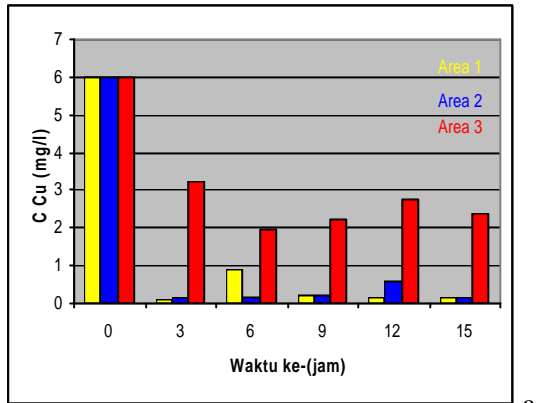
- Keterangan
- = Kabel
 - = Area katoda
 - = Katoda
 - = Arus (I)
 - = Model konfigurasi hexagonal
 - = Digitalmeter

Analisis data konsentrasi Cu dan Hg dilakukan pada titik sampel A, B, C (area 1), A1, C1, E1 (area 2) dan A2, C2, E2 (area 3) selama 15 jam dengan interval waktu 3 jam. Analisis ini dilakukan per area yaitu;

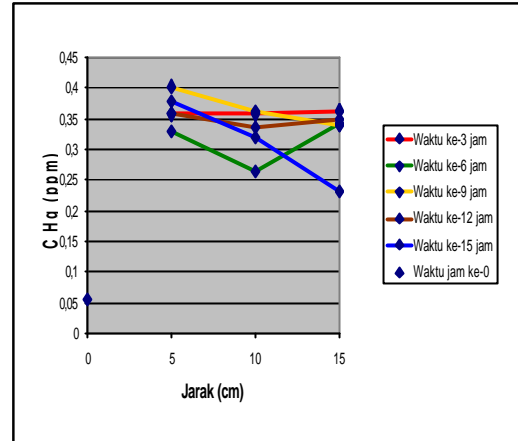
- a. Area efektif yang terdiri dari:
 1. Area 1 berada pada 15 cm dari katoda
 2. Area 2 berada pada 10 cm dari katoda
 3. Area 3 berada pada 5 cm dari katoda

b. dan pada waktu 0 jam

Setelah sampel tanah tailing mengalami proses remediasi elektrokinetik dengan variasi konfigurasi elektroda 2D *hexagonal*, sampel tanah tailing ini kemudian dianalisa dengan metode AAS.

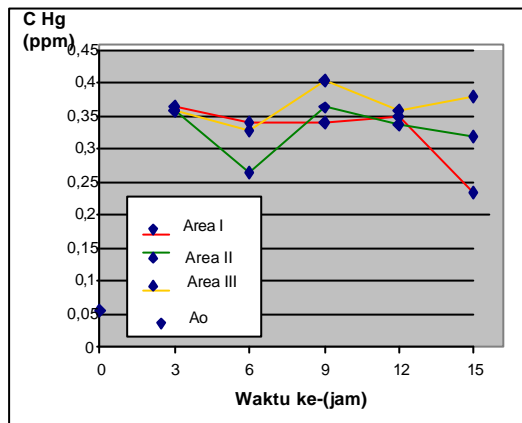


a.



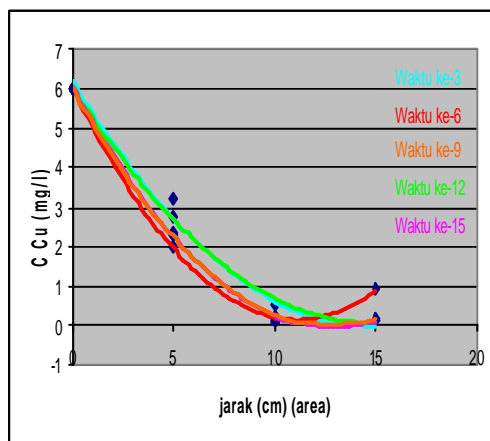
b.

Gambar 5. Konsentrasi Cu (gambar a) dan Hg (gambar b) pada setiap interval waktu terhadap jarak



b.

Gambar 4. Konsentrasi Cu (gambar a) dan Hg (gambar b) terhadap waktu



a.

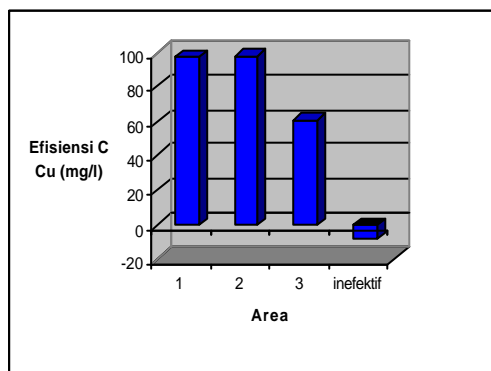
Gambar 5 secara umum, menunjukkan adanya penurunan konsentrasi terhadap jarak pada setiap waktu dari kedua logam tersebut dengan gradien yang tidak sama. Penurunan konsentrasi tersebut disebabkan karena terjadinya proses elektromigrasi karena terjadinya perpindahan ion-ion pada logam. Ion-ion yang berpindah adalah ion yang bermuatan negatif bergerak ke ion-ion positif (kation) sedangkan ion-ion yang bermuatan positif akan bergerak ke ion-ion negatif (anion). Elektromigrasi dapat lebih efektif ketika ion hidrogen tidak memiliki mobilitas yang baik dari pada ion hidroksil, sehingga ion hidrogen lebih mudah bergerak di tanah (Acar dan Alshawabkeh, 1993). Selain itu, secara fisis logam Cu dan Hg digolongkan ke dalam kelompok logam-logam penghantar listrik yang baik. Hal ini berarti dari logam Cu maupun Hg merupakan konduktor yang baik. Meningkatnya konsentrasi pada waktu tertentu disebabkan karena proses elektromigrasi dan elektrosmosis tidak berlangsung dengan baik. Fenomena ini menurut Alshawabkeh, 1993 bahwa ukuran ion dari proses elektromigrasi dapat efektif apabila ukuran ion hidrogen H^+ kecil sehingga memiliki mobilitas yang baik dari pada ion hydroxyl.

Efisiensi Remediasi

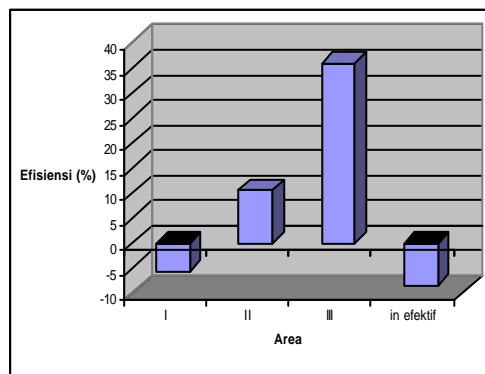
Perhitungan efisiensi remediasi disajikan pada gambar 6, dan nilai efisiensi konsentrasi dihitung dengan menggunakan persamaan

$$E = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

Pada Gambar 6 dapat terlihat bahwa nilai efisiensi terbesar terjadi pada area 2 untuk Cu sebesar 98 %. Sedangkan efisiensi terendah terjadi pada area inefektif yaitu sebesar -8,8 %. Nilai efisiensi tertinggi pada area 2 disebabkan karena area 2 merupakan area yang mengalami proses remediasi (elektrolisis dan elektromigrasi) secara intensif. Proses ini terjadi di dalam elektrolite yang mana memberikan energi bagi ion-ion untuk berpindah di antara elektroda yang dialiri arus DC. Sedangkan terjadinya elektromigrasi karena perpindahan ion-ion hidrogen dan ion-ion hidroksyl.



a.



b.

Gambar 6. Nilai efisiensi remediasi Cu (gambar a) dan Hg (gambar b) di setiap area

Terjadinya peningkatan konsentrasi di area inefektif yang merupakan area yang terletak diluar area *hexagonal* karena masih adanya pengaruh medan listrik walaupun kecil. Menurunnya konsentrasi Cu juga disebabkan karena adanya mekanisme *electrophoresis*. Terjadinya *electrophoresis* karena limbah tailing dimungkinkan memiliki ukuran partikel yang lebih besar sehingga ion akan sulit untuk berpindah. Karena secara fisik komposisi tailing terdiri dari 50% fraksi pasir halus dengan diameter (0,075 – 0,4) mm dan sisanya berupa fraksi lempung dengan diameter 0,075 mm. Gerakan perpindahan molekul ke arah katoda atau anoda pada *electrophoresis* disebut dengan kecepatan migrasi.

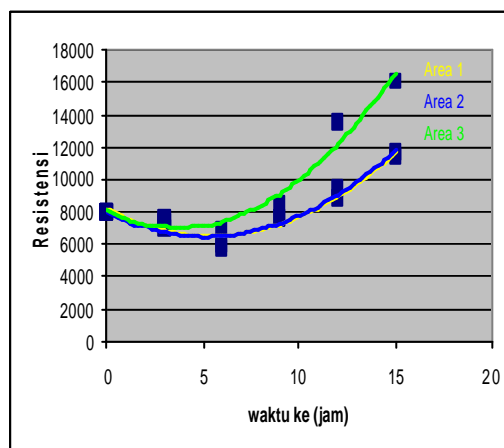
Untuk Hg nilai efisiensi pada area 1 sebesar 36%, pada area 2 sebesar 11%, pada area 3 diperoleh nilai (negatif) sebesar -6% yang berarti pada area ini tidak terjadi penurunan konsentrasi logam merkuri (Hg) dikarenakan dekatnya jarak area 3 dengan katoda yang merupakan tempat berkumpulnya logam merkuri (Hg). Efisiensi penurunan konsentrasi di area inefektif yang nilainya (negatif) yaitu sebesar -9% berarti di area ini masih mengandung logam berat merkuri (Hg) yang tinggi konsentrasinya. Kecilnya nilai efisiensi pada area 3 disebabkan karena migrasi ion-ion merkuri (Hg) yang berkumpul pada area ini terlalu besar konsentrasi logam Hg di dalam tanah sampel dan kurang lamanya waktu remediasi juga menyebabkan efisiensi kurang optimum. Hal ini sesuai dengan Pamukcu (1994), yang menyatakan bahwa penurunan ion-ion logam tergantung pada jenis kontaminan dan konsentrasi, elektroda yang dipakai, konfigurasi elektroda yang dipakai, biaya, tingkat voltase dan arus yang dipakai serta lamanya waktu remediasi.

Penurunan konsentrasi akhir dapat dilihat di setiap area pada jam ke-15. Rendahnya nilai konsentrasi awal merkuri tidak dapat menjadi tolok ukur untuk mengetahui besarnya penurunan konsentrasi merkuri di setiap area. Berhasil atau tidaknya remediasi elektrokinetik ini dapat dilihat dari besarnya nilai konsentrasi di area 3 yaitu

area yang dekat dengan katoda. Hal ini menandakan bahwa konsentrasi di sekitar katoda akan mengalami kenaikan konsentrasi setelah proses remediasi elektrokinetik, bukan penurunan konsentrasi. Kecilnya nilai efisiensi disebabkan karena adanya indikasi fenomena elektromigrasi di bawah pengaruh medan listrik yang kurang maksimal, yang menyebabkan perpindahan ion-ion ke elektroda lambat. Ion-ion positif (kation) akan menuju atau menempel pada batang katoda ion-ion negatif (anion) akan menempel pada batang anoda.

Resistivitas

Pengukuran resistivitas medium dilakukan di setiap area pada interval waktu (3jam, 6jam, 9jam, 12jam, dan 15jam) dengan Power Supply dimatikan terlebih dahulu. Hasil pada pengukuran tersebut digrafikkan pada gambar 7 antara nilai resistivitas terhadap waktu. Gambar 7 menunjukkan terjadinya kenaikan nilai resistivity. Semakin lama waktu remediasi berlangsung, nilai resistivity semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena jumlah ion-ion penghantar (ion muatan positif) pada proses migrasi berkurang. Penumpukan kation pada katoda menyebabkan luas penampang katoda menjadi kecil, hal ini juga menyebabkan kenaikan pada nilai resistensi (Buece, 1989).



Gambar 7. Hubungan Resistensi terhadap jarak

Fenomena yang Terjadi

Sekitar 5 menit setelah *power supply* dinyalakan, keluar gelembung-gelembung air

dari katoda yang lama kelamaan berwarna putih susu seperti yang diperlihatkan pada gambar 8. Keluarnya gelembung-gelembung dari katoda disebabkan oleh adanya proses elektroosmosis. Gerakan air yang terjadi dalam tanah di sekitar katoda disebut dengan elektroosmosis (Kim, 1998). Fenomena lain yang terjadi setelah 1 jam adalah adanya warna yang timbul seperti karat pada anoda dengan titik sampel B dan C seperti pada gambar 9 Kemudian disusul oleh elektroda-elektroda yang lain dan di samping reaktor terlihat warna abu-abu serta sedikit bintik orange (gambar 10 dan 11) pada permukaan tanah setelah berlangsung kurang lebih 2 jam. Adanya bintik orange pada permukaan adalah warna tembaga itu sendiri yaitu orange menyala (Bentor, 1996). Hal ini berarti bahwa dalam kandungan tanah banyak mengandung unsur tembaga. Karena selain pada tanah itu sendiri yang mengandung tembaga, karbon yang digunakan sebagai elektroda memiliki kandungan CuO (Cooper Oxide). Sedangkan warna abu-abu yang nampak pada samping reaktor merupakan warna dari merkuri (Hg) dan cadmium (Cd) serta dimungkinkan ada logam-logam lain yang terkandung yang memiliki warna asli abu-abu.

5. KESIMPULAN

1. Tanah penambangan emas yang terkontaminasi logam berat Cu dan Hg dapat diremoval dengan menggunakan remediasi elektrokinetik konfigurasi 2D *hexagonal* dengan efisiensi sebesar 61% dan 36 %.
2. Untuk keadaan tanah yang masih dalam keadaan basah, dibutuhkan waktu yang lebih banyak untuk meremediasi. Hal ini dikarenakan proses elektrolisis yang terjadi akan berkurang sehingga tidak dapat menaikkan nilai pH.
3. Terdapat fenomena gelembung air di sekitar katoda. Air yang keluar disebabkan karena proses elektroosmosis. Sedangkan adanya warna orange menyala pada permukaan tanah merupakan warna

asli dari Cu dan warna abu-abu pada samping reaktor merupakan warna asli dari Hg, Cd dan logam-logam berat lain yang memiliki warna asli abu-abu.

4. Konsentrasi Cu dan Hg dalam tanah setelah dilakukan proses remediasi pada area katoda lebih banyak dibanding pada area anoda dikarenakan terjadinya electromigrasi yaitu berpindahnya ion



Gambar 8. Gelembung air dan warna putih susu yang keluar dari katoda

Cu^{2+} dari setiap area bergerak menuju katoda.

5. Penambangan emas di daerah kopak Kulonprogo perlu mendapatkan perhatian ekstra baik itu penanggulangannya maupun sistem pengolahan limbah, hal ini dikarenakan penggunaan merkuri yang sangat berbahaya serta limbah Cu^{2+} dari hasil pemurnian emas.



Gambar 9a. Warna seperti karatan yang timbul di titik B



Gambar 9b. Warna seperti karatan yang timbul di titik C



Gambar 10. Warna orange yang timbul di permukaan dan yang nampak dari samping reaktor

DAFTAR PUSTAKA

- Acar, Y.B. and Alshwabkeh, A.N., 1993, *Principles of Electrokinetic Remediation, Environmental Science and Technology*, Vol.27, No.13, pp.2638- 2647.
- Bentor, Yinon, 1996. www.ChemicalElements.com.

- College Physics, Mac Graw Hill, Inc.
- Eykholt, G.R. 1992, *Driving and Complicating Features of the Electrokinetic Treatment of Contaminated Soils*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Eng., Univ. of Texas at Austin, p.269.

- Eykholt, G.R. and Daniel, D.E., 1994, Impact of System Chemistry on Electro osmosis in Contaminated Soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.5, pp.797-815.
- Gunawan, Kuswandani, Fauzan, Sofyan, A., Setiawan, L., Subarna, Juju, Ariyadi, W. dan Suhendi, E., 2001. Percontohan Penambangan Emas di Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Puslitbang Tekmira, Bandung.
- Kim, H. T., 1998, Dasar-Dasar Kimia Tanah, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Pamukcu. S., 1994, Electro-Chemical Technologies for in-situ Restoration of Contaminated Subsurface Soils, Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem, USA.
- Palar. H, 1994, Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat, Rineke Cipta, Jakarta.
- Rahardjo, W, Sukandar R., Rosidi, H.M.D., 1995, *Peta Geologi Bersistem Lembar Yogyakarta* (1408-2 dan 1407-5), Direktorat Geologi, Departemen Pertambangan dan Energi R.I, Jakarta.