

PENYISIHAN TIMBAL (Pb) DARI TANAH TERKONTAMINASI DENGAN PROSES ELEKTROMIGRASI

Wahyu Purwanta

Peneliti di Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Lingkungan
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

Abstract

This study is trying to apply a new method in remediation electrokinetic by inserting conductive solution between cathode and soil to be treated. This is purposed in keeping the pH in low condition and preventing the precipitation of heavy metals in the soil adjacent to the cathode that often happen in the previous electrokinetic methods. Concentration of Pb (C_0), period (t), concentration of conductive solution were selected as parameters, both with artificially contaminated sand and naturally contaminated soil experiments. The experiment with natural soil $C_0 = 975$ ppm gave lower efficiency at 32,84% when it compares with sand as the medium, with the experiment in the same condition at 87,68%. Concentration of KCl also influenced the performance of system which was shown by the increasing in removal efficiency. The double increase of conductive solution concentration does not proportionally increase the flux of Pb. Although desorption in the natural soil take time longer than in the sand the removal efficiency relatively low. This is caused by the immobile state of Pb in the natural soil and the complexity of chemical reaction between heavy metals with surface of soil particle.

Key words : electrokinetic, lead (Pb), electromigration

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah yang terkontaminasi logam berat, merupakan masalah lingkungan yang serius, sayangnya sampai saat ini belum banyak tersedia suatu teknologi pembersihan yang efektif. Sekarang sedang berkembang suatu teknik baru yakni remediasi elektrokinetika. Teknik ini cukup mudah dalam aplikasinya dan minim menggunakan bahan-bahan kimia sehingga cukup prospektif dalam pengembangannya.

Dalam metode ini suatu arus searah (DC) dilewatkan tanah terkontaminasi sehingga menyebabkan logam kontaminan bergerak pindah kearah elektroda meninggalkan tanah. Beberapa kontaminan yang pernah diteliti antara lain Cd, Cr dan Pb⁽¹⁾, Zn dan Pb (Hicks, 1993). Pb dan Hg (Shem, 1992) semua dalam skala laboratorium serta skala lapangan untuk Asam Asetat dan Phenol⁽²⁾.

Dalam teknik elektrokinetika konvensional, elektroda disisipkan secara langsung ke dalam tanah yang diolah, akibatnya hidroksil yang timbul

di katoda bergerak ke tanah yang mengakibatkan naiknya pH dekat/ sekitar katoda. Karena logam berat terpresipitasi pada pH tinggi dan lebih jauh lagi suatu pH tinggi mendorong/ konduktif bagi sorpsi logam berat di atas permukaan tanah, maka logam berat terbanyak akan ditemui di tanah dekat katoda setelah proses remediasi. Disinilah letak permasalahan/ kelemahan metode terdahulu.

Dalam penelitian ini suatu cara baru dicoba dikembangkan. Melalui metode ini suatu larutan penghantar (elektrolit) disisipkan diantara katoda dengan tanah yang diolah. Dengan cara ini logam berat dapat berpindah keluar dari tanah sebelum terpresipitasi sebagai hidroksida. Untuk mempelajari kinetika dari metoda ini, sejumlah percobaan dengan berbagai kondisi telah dilakukan dengan menggunakan Timbal (Pb) sebagai kontaminan serta pasir sebagai media tanah dan KCl sebagai larutan penghantar dan simulasi air tanah.

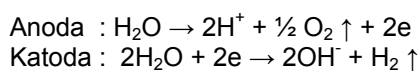
2. DASAR TEORI

Timbal (Pb) dalam tanah selain dari materi geologis asal suatu tanah, umumnya berasal dari deposisi kering, deposisi basah dan juga berasal dari pembuangan Lumpur (*sewage sludge*) ke tanah. Sumber lain adalah dari limpasan air irigasi dengan konsentrasi Pb tinggi atau juga dari *smelter*, *paint flaking*, pestisida, *fertilizer* dan bahan baker bertimbal.

Pada kondisi tanah tak tercemar, konsentrasi Pb akan berkisar 2 s.d 200 mg/kg berat kering³⁾ atau 20 s.d 200 mg/kg⁴⁾ Menurut Horison (1994) apabila konsentrasi di suatu lokasi tanah lebih dari 200 mg/kg, maka sudah dapat dikategorikan sebagai tanah tercemar.

Di dalam tanah, Pb akan berpasangan dengan anion seperti SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , dan CO_3^{2-} membentuk garam-garam terlarut. Senyawa-senyawa lain yang bersama Pb membentuk basa karbonat antara lain $\text{Pb}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ dan $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ (*chloropyromorphite*). Timbal (Pb) umumnya berada dalam beberapa kompartemen utama dalam tanah seperti larutan tanah, *adsorption surface of the clay-humus exchange complex*, bentuk terpresipitasi sekunder dalam oksida Fe dan Mn, *soil humus* dan *silicate lattices*⁵⁾.

Dalam teknik penyisihan suatu logam berat dengan prinsip elektrokinetika, pemahaman akan proses-proses elektrokimia menjadi penting. Seperti diketahui bahwa reaksi elektrokimia merupakan reaksi-reaksi elektroda yang digerakan oleh arus listrik yang mengalir diantara anoda dan katoda. Pada reaksi elektrolisis air, reaksi-reaksi yang terjadi adalah;



Dalam reaksi ini anoda menghasilkan ion-ion hidrogen, sedangkan katoda menghasilkan ion-ion hidroksil yang masing-masing menghasilkan permukaan asam dan basa disekitarnya²⁾.

Menurut prinsip hukum Faraday, arus adalah fungsi perpindahan sejumlah muatan (Q) per satuan waktu (t) atau lebih sederhananya berupa jumlah elektron yang berpindah selama proses elektrolisis yang dinyatakan dengan;

$$Q = n.F.M \quad (\text{coulomb}) \quad (1)$$

Q merupakan muatan yang terbentuk akibat ionisasi M mol bahan (misal Pb^{2+} , dll) sehingga;

$$\frac{dQ}{dt} = nF \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

$$\text{jika } \frac{dM}{dt} = J \text{ dan } \frac{dQ}{dt} = i \text{ dimana}$$

J = fluks bahan ($\text{mol m}^{-2} \text{ dt}^{-1}$) dan i adalah rapat arus (Amp m^{-2}) maka,

$$J = \frac{i}{nF} \quad \text{mol m}^{-2} \text{ det}^{-1} \quad (3)$$

Fluks bahan (J) akan terkait dengan perpindahan massa.

Dalam praktek aplikasi prinsip elektrolisis untuk penyisihan kontaminan dari tanah di bawah pengaruh medan listrik, dikenal 3 mekanisme utama, yakni elektroosmotik, elektroporesis dan elektromigrasi. Elektromigrasi merupakan perpindahan suatu ion bermuatan dalam suatu larutan, sedangkan pada elektro osmotik suatu larutan yang mengandung ion bergerak relatif terhadap suatu permukaan bermuatan yang stationer. Elektroporesis kebalikan dari elektroosmotik, dimana partikel bermuatan bergerak relatif terhadap cairan yang stationer (Hicks dkk, 1993).

Mempertimbangkan kondisi percobaan dalam penelitian ini maka elektroosmosis dapat dieliminir dan hanya mempertimbangkan proses elektromigrasi saja. Laju fluks massa seperti diuraikan dalam persamaan (3) diatas sebenarnya juga menggambarkan laju reaksi elektroda (r_{mt}) yang terjadi dimana,

$$r_{mt} = \frac{I}{nFA} \quad \text{mol cm}^{-2} \text{ det}^{-1} \quad (4)$$

Persamaan lengkap satu dimensi untuk transfer massa dalam proses elektromigrasi tersebut diatas diformulasikan oleh dan dikenal dengan persamaan Nernst-Planck sbb;

$$J_{i(x)} = -D_i \frac{\partial C_{i(x)}}{\partial x} - \frac{n_i F}{RT} D_i C_j \frac{\partial \phi_{(x)}}{\partial x} + C_i V_{(x)} \quad (5)$$

dimana, $J_{i(x)}$ = fluks massa unsur -i ($\text{mol m}^{-2} \text{ dt}^{-1}$); D_i = koefisien difusi unsur -i ($\text{m}^2 \text{ dt}^{-1}$); n_i = jumlah muatan ion; C_i = konsentrasi unsur -i (mol m^{-3}) dan $V_{(x)}$ = kecepatan fluida (m dt^{-1}).

Dalam banyak penelitian elektromigrasi (termasuk penelitian ini), faktor $C_i V_{(x)}$ atau adveksi sering ditiadakan⁶⁾. Dalam

pemahaman persamaan (5), Bard (1980) menyatakan bahwa arah dan besarnya arus (kontribusi) akibat difusi (i_d) dan migrasi (i_m) akan berbeda disetiap lokasi dan waktu tertentu. Di dekat elektroda arus bisa disebabkan oleh keduanya sementara di ruah larutan mungkin difusi menjadi lebih kecil dibanding migrasinya. Arah i_d dan i_m akan sangat tergantung pada arah medan listrik dan muatan listrik ion yang bersangkutan.

Secara lebih sederhana fenomena perpindahan massa pada proses berdasar elektrolisis ini dapat ditunjukkan oleh suatu koefisien transport massa K_L sebagai berikut,

$$i = n \cdot F \cdot K_L \cdot C \text{ atau } I = n \cdot F \cdot K_L \cdot C \cdot A \quad (6)$$

dimana, i = rapat arus (Amp m^{-2}), K_L = koefisien transpor massa (m dt^{-1}), I = kuat arus (Amp), n = jumlah muatan elektron, C = konsentrasi larutan (mol m^{-3}), F = konstanta Faraday, A = luas elektroda (m^2).

Dengan mengacu pada persamaan (6) dimana I yang digunakan adalah total I yang terbaca melalui alat ukur sedangkan C adalah konsentrasi ion Pb yang tersisihkan, maka K_L bermakna sebagai koefisien transfer massa ion Pb dalam percobaan baik akibat arus migrasi ionik maupun arus akibat difusi.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini sebelumnya telah dilakukan percobaan dalam media pasir (*artificial contaminated sand*) dimana Pb sengaja dipaparkan pada media pasir seragam pada konsentrasi $C_0 = 100, 400, 900$ ppm, waktu percobaan $T = 8, 24, 48$ jam serta KCl 0,01 M. Namun hasil percobaan tersebut tidak akan dibahas dalam tulisan ini tetapi hanya sebagai pembandingan.

Pada percobaan dalam penelitian kali ini akan digunakan media pasir seragam dengan $C_0 = 975$ ppm serta sampel tanah asli juga $C_0 = 975$ ppm serta $T = 48$ jam dan larutan KCl 0,01 M dan 0,02 M.

a. Peralatan dan Bahan

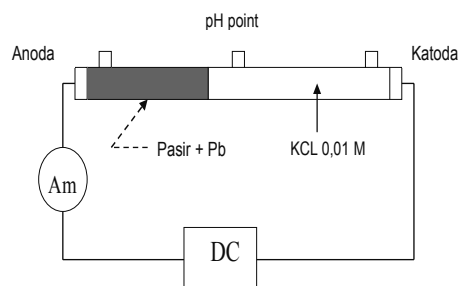
- Tabung flexiglass 1 meter dan $\varnothing 5$ cm
- Elektroda karbon tebal 0,75 cm, $\varnothing 5$ cm
- Sumber arus (DC) 30 – 70 V
- Multimeter
- Conductivity meter
- AAS
- Pasir (silika) $\varnothing 0,15-0,2$ mm
- Tanah Muara Karang (MK)
- Timbal Nitrat [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$]

- Asam Nitrat [HNO_3]
- Asam Klorida [HCl]
- Asam demineral

b. Prosedur Percobaan

Secara diagramatis, penelitian dilakukan sesuai gambar 1, dimana penyiapan masing-masing langkah penelitian adalah sbb; Sampel pasir

- Sampel pasir sebanyak 0,69 kg untuk tiap percobaan dan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ sebesar 1074,7 gram agar diperoleh $C_0 = 975$ ppm per berat kering pasir.
- Penyiapan larutan KCl 0,01 M.
- Mencampurkan 1074,7 gr $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ke dalam pasir dan aduk rata.
- Memasukan larutan KCl ke dalam tabung flexyglass secara vertikal.
- Memasukan pasir yang telah tercampur timbal nitrat ke dalam tabung, tunggu sampai gelembung udara keluar semua lalu disisipkan filterglass.
- Memasukan sisa larutan KCl sampai penuh seluruh tabung lalu ditutup dengan elektroda karbon dan hubungan dengan sumber arus.
- Pengamatan dilakukan tiap 1 jam terhadap besaran arus dan pH baik di titik dengan anoda, katoda dan dekat filterglass.



Gambar 1. Rangkaian Alat Percobaan

Sampel Tanah Alami

- Sampel tanah alami yang tercemar diambil dari tanah di Muara Karang (MK) Jakarta Utara yang secara visual memang telah tercemar logam berat.
- Penyusunan rangkaian percobaan sama dengan yang dilakukan pada media pasir sesuai gambar 1.
- Sementara kandungan awal Pb telah diekstrak dengan metode standard menggunakan Atomic Absorption Spectrometry, SHIMADZU AA-6401.

- Ekstraksi terhadap kandungan Pb ditujukan untuk memperoleh konsentrasi Pb total, sampel yang digunakan untuk ekstraksi adalah hasil *sieving* dengan ukuran kurang dari 80 mesh.

Adapun kondisi percobaan secara keseluruhan adalah sbb:

Tabel 1. Kondisi Percobaan

No.	Media	[Pb] (ppm)	KCl [M]	T (jam)	DC (V)
1	Tanah MK	975	0,01	48	40
2	Tanah MK	975	0,02	48	40
3	Pasir	975	0,01	48	40
4	Pasir	975	0,02	48	40

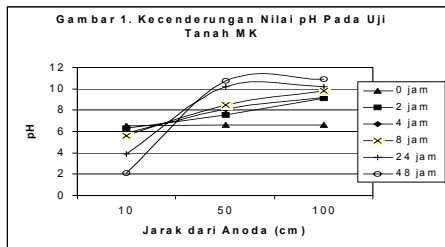
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisa terhadap tanah MK diperoleh komposisi pasir 50%, *silt* 20,2 % dan *clay* 29,8%. Tanah yang demikian umumnya disebut tanah lempung berpasir (*sandy clay*). Sedangkan sampel pasir disebut tanah pasir karena kandungan pasirnya diatas 85%.

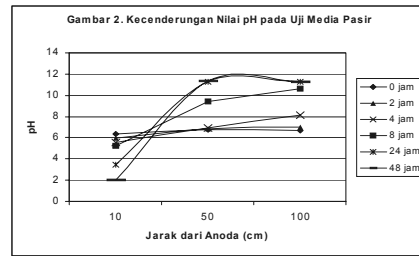
Secara teoritis, konduktivitas sistem sangat menentukan dalam pencapaian hasil akhir seluruh percobaan elektromigrasi ini.

Pengukuran terhadap pH di titik dekat katoda menunjukkan nilai rendah (asam) pada awal pengukuran dan naik tajam setelah 8 jam. Ini menunjukkan perbedaan pH yang tajam (*pH jump*) terjadi di sekitar / dekat katoda di awal percobaan. *pH jump* akan bergerak ke arah anoda seiring terdesaknya permukaan asam oleh permukaan basa yang dihasilkan di anoda.

Pada awal tiap percobaan ion OH⁻ yang dihasilkan katoda, digunakan untuk pembentukan presipitat oleh logam (Pb) atau oleh kation-kation lain yang mungkin ada di tanah serta telah melampaui tetapan kelarutan standardnya. Hal ini menyebabkan *pH jump* masih berada dekat katoda.



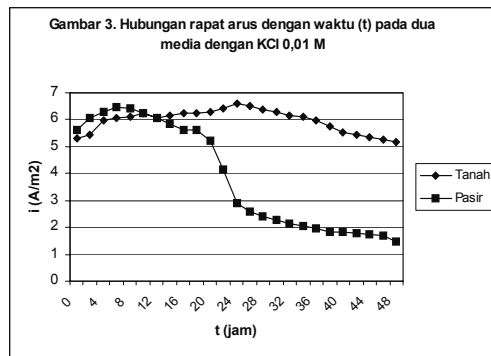
Gambar 1 dan gambar 2 menunjukkan pola kecenderungan perubahan pH baik pada media pasir maupun media alami dengan pola yang hampir mirip.



Anoda yang terus menerus menghasilkan ion H⁺ akan ditarik kearah permukaan partikel tanah yang bermuatan negatif, akibatnya konsentrasi ion H⁺ yang bergerak kearah katoda sangat terbatas serta mobilitasnya berkurang akibat keberadaan butiran tanah.

Dengan kata lain pergerakan ion H⁺ menjadi lebih lambat bila dibandingkan ion OH⁻ yang dihasilkan di katoda. Pada percobaan ini KCl ditambahkan guna mendapatkan suatu larutan yang konduktif.

Hasil percobaan yang mengacu pada kondisi percobaan sesuai Tabel 1 memperlihatkan adanya perbedaan pola rapat arus (*i*) baik pada tanah asli yang terkontaminasi Pb dengan media pasir. Gambar 3 dan gambar 4 memperlihatkan secara umum perbedaan pola rapat arus yang dimaksud dala skala waktu 48 jam dan pada konsentrasi KCl 0,01 M dan 0,02 M.



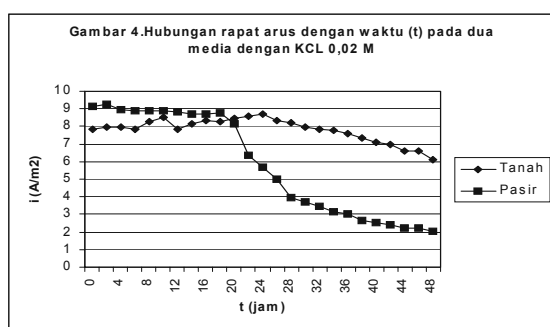
Dengan potensial tegangan sel yang tetap, pada media pasir arus meningkat di awal percobaan (+/- 8 jam) kemudian menurun sepanjang sisa waktu 48 jam dan ada kecenderungan konstan pada tingkat arus yang rendah. Naiknya arus di awal percobaan disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi ion Pb akibat proses desorpsi dari permukaan tanah dan disolusi presipitat pada daerah pH rendah (sekitar anoda). Konduktivitas "sistem" tercermin dalam pola arus yang terjadi

sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (6) diatas.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pada konsentrasi Pb yang lebih tinggi, akan membangkitkan arus awal (saat $t \approx 0$) yang juga lebih tinggi bila dibandingkan pada konsentrasi Pb yang lebih rendah (Probst, 1993).

Pada konsentrasi tinggi arus dibangkitkan akibat kontrol kinetika yang berlangsung lebih cepat bila dibandingkan pada konsentrasi yang lebih rendah. Fluks (J) merupakan fungsi dari konsentrasi ion Pb yang bermigrasi (C), serta besarnya beda potensial listrik (Φ) sesuai persamaan (5). Nilai fluks Pb yang terus meningkat berlawanan dengan arus total yang terukur yang justru terus menurun. Ini bisa diartikan peran ion Pb dalam arus total terus meningkat seiring waktu percobaan. Dengan kata lain di awal percobaan arus lebih banyak dibangkitkan oleh ion-ion lain selain ion Pb.

Turunnya arus seiring waktu bisa diartikan sebagai mulai lambatnya laju reaksi di elektroda. Diduga telah terjadi deteriorasi di elektroda karbon (perlu penelitian lebih dalam) yang menyebabkan menurunnya luas permukaan efektif elektroda. Selain itu juga diperkirakan telah terjadi kejenuhan ion disekitar elektroda sehingga hanya sedikit sekali ion yang masih tetap bergerak dan berpindah ke elektroda pada waktu diatas jam ke-48. Kemungkinan lain yang turut menyebabkan turunnya arus adalah terjadinya *fouling* di elektroda (masih harus dibuktikan) sehingga menghambat transfer elektron ke elektroda.



Pada media tanah alami (MK) yang tercemar Pb (975 ppm), pola kenaikan rapat arus yang linier bisa terjadi sampai 24 jam, baru kemudian terjadi penurunan secara eksponensial. Karena percobaan dilakukan selama 48 jam, dapat diduga penurunan secara eksponensial pada media tanah masih akan berlangsung di atas 48 jam.

Tetap naiknya arus secara linier selama 24 jam pada tanah asli adalah akibat proses desorpsi berbagai kation yang terkandung dalam tanah baik yang terdeteksi maupun yang tidak terdeteksi, yang mana jumlah dan jenis kation jauh lebih banyak dibanding pada media pasir murni. Transport kation inilah yang terus mempertahankan terjadinya arus listrik. Selain itu luas permukaan tanah pasir berlempung juga relatif lebih besar dibanding tanah pasir, hal ini berakibat reaksi-reaksi seperti pertukaran kation juga memiliki laju yang lebih besar dibanding tanah pasir.

Konstanta arus yang cukup lama membuat rapat arus pada media tanah asli rata-rata $5,96 \text{ A m}^{-2}$, lebih tinggi dibanding pada media pasir yang hanya $3,89 \text{ A m}^{-2}$. Akan tetapi pada media pasir dengan kontaminasi Pb yang sengaja ditaburkan, arus yang terjadi hampir sebagian besar berasal dari kontribusi perpindahan ion Pb, fluks Pb yang berpindah pada media pasir berkisar $1,54 \times 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$ sementara pada media tanah berkisar $4,9 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$ dengan menggunakan KCl 0,01 M.

Rendahnya fluks perpindahan Pb pada tanah alami selain akibat banyaknya kation diluar Pb juga disebabkan bentuk-bentuk Pb di tanah alami itu sendiri sudah bervariasi serta berbeda tingkat stabilitasnya. Sehingga proses desorpsi dan disosiasi Pb menjadi sangat lamban dan sulit.

Dalam struktur tanah yang mengandung *clay* ada kemungkinan oksida Fe dan Mn menjadi co-presipitat atau mengadsorpsi Pb yang menjadikannya sulit bertukarkan dalam reaksi *ion exchange*. Dengan kata lain pada tanah asli, mobilitas ion Pb sudah sangat rendah. Selain itu di dalam tanah juga terdapat banyak kation (seperti Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , dll) dengan berbagai tingkat valensi dan radius hidrasi. Akibatnya kation-kation akan mengalami kompetisi dalam proses-proses seperti pertukaran ion yang mengawali proses elektromigrasi. Ini bisa berarti kation lain selain Pb telah "terlepas" lebih dahulu dibanding Pb dan turut menyumbang pada komposisi presipitat yang terbentuk.

Kondisi ini otomatis menyebabkan efisiensi penyisihan Pb pada tanah alami hanya mencapai rata-rata 32,85% bila dibanding dengan media pasir yang mencapai rata-rata 87,69% pada kandungan awal Pb serta konsentrasi larutan yang sama.

Dalam percobaan ini digunakan dua jenis konsentrasi KCl yakni 0,01 M dan 0,02 M guna melihat pengaruh yang diakibatkan

keduanya. Pada KCl 0,02 M baik pada media pasir maupun tanah alami dihasilkan rapat arus yang lebih besar. Namun hal ini tidak secara ekstrim berpengaruh pada fluks perpindahan Pb dimana bila pada media tanah alami dengan KCl 0,01 M didapat sekitar $4,89 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$ menjadi sekitar $9,48 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$ pada KCl 0,02 M.

Naiknya rapat arus Pb yang berpindah adalah akibat berubahnya kuat daya ionik (ionic strength) dari sistem yang juga berakibat berubahnya mobilitas ion dan potensial elektroda. Pada media pasir pasir, naiknya konsentrasi larutan KCl walau berakibat pada kenaikan arus total, tetapi efisiensi arus Pb tidak proporsional dalam kenaikannya. Hal ini disebabkan ion-ion dari KCl 0,02 M mengambil peran yang lebih besar daripada Pb dalam konduktivitas sistem. Akibatnya Pb yang tersisihkan naik dari 855 ppm menjadi 917 ppm atau naik 107% bila dibandingkan konsentrasi KCl yang naik 200%.

Hasil Pb yang tersisihkan baik pada media tanah dan pasir serta fluks dan efisiensi energi yang terjadi dapat dilihat pada LAMPIRAN.

5. KESIMPULAN

Dengan metode yang diterapkan, Pb dapat tersisihkan dimana konsentrasi awal Pb dalam media (C_0), periode percobaan (t), konsentrasi larutan elektrolit (KCl), serta jenis media padat mempengaruhi tingkat efisiensi penyisihan dan koefisien transfer massa (K_L) Pb dalam sistem.

Pada media tanah alami dengan $C_0 = 975$ ppm, $t = 48$ jam dan KCl 0,01 M diperoleh nilai $K_L = 4 \times 10^{-5} \text{ m/det}$ dan efisiensi 32,84%, lebih rendah bila dibandingkan pada media pasir dengan kondisi percobaan yang sama, dimana $K_L = 9,92 \times 10^{-6} \text{ m/det}$ dan efisiensi 87,68%. Sementara dengan KCl 0,02 M pada tanah alami dan pasir berhasil menaikkan efisiensi penyisihan menjadi masing-masing sebesar 63,85% dan 94,06%.

Dari percobaan terlihat bahwa karena sistem tertutup, maka proses penyisihan Pb dapat dilakukan dengan elektromigrasi itu sendiri, sementara proses seperti elektroosmosis dapat diabaikan. Karena ion Pb terpresipitasi di luar tanah, maka porositas dan tortuositas media padat diharapkan tidak banyak berubah. Penurunan konduktivitas terjadi akibat berubahnya atau menurunnya aktivitas dan mobilitas ion serta meningkatnya resistensi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

1. Li, Z., Ji Wei Yu, Neretnieks, 1997, *Removal of Pb (II), Cd (II), and Cr (II) from sand by electromigration*, Journal of Hazardous Materials, 55 (295-304)
2. Probstein, R & E, Hicks., 1993, *Removal of Contaminants from Soils by Electric Fields*, Science Vol 260.
3. Harrison, R.M & D.P, Laxen, 1984, *Lead Pollution – causes and control*, London, Chapman & Hall
4. Lindsay, W.L, 1979, *Chemical Equilibria in Soils*, New York, John Wiley & Sons.
5. Alloway, B.J, 1995, *Heavy Metals in Soils – 2nd edition*, Glasgow, Blackie Academic & Professional.
6. Bard, A.J & L.R, Faulkner, 1980, *Electrochemical Methods – Fundamentals and Applications*, New York, John Wiley & Sons.
7. Goodridge, 1995, *Electrochemical Process Engineering – A guide to design of lectrolytic plant*, New York, Plenum Press

LAMPIRAN

Tabel L.1 Data Pengukuran Arus dan Konduktivitas Pada Tanah MK (Pb : 975 ppm)

Jam Ke	KCl (0,01 M)			KCl (0,02 M)		
	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)
0	10,4	1191,81	5,29	15,42	1767,09	7,85
2	10,71	1227,33	5,45	15,7	1799,17	7,99
4	11,72	1343,08	5,97	15,6	1787,71	7,94
6	11,91	1364,85	6,06	15,46	1771,67	7,87
8	12	1375,16	6,11	16,28	1865,64	8,29
10	12,3	1409,54	6,26	16,7	1913,77	8,50
12	11,95	1369,43	6,08	15,38	1762,50	7,83
14	12,13	1390,06	6,17	16,06	1840,43	8,17
16	12,25	1403,81	6,24	16,35	1873,66	8,32
18	12,29	1408,40	6,26	16,41	1857,62	8,25
20	12,31	1410,69	6,27	16,56	1897,73	8,43
22	12,62	1446,21	6,42	16,81	1926,38	8,56
24	13	1489,76	6,62	17,16	1966,48	8,73
26	12,81	1467,99	6,52	16,35	1873,66	8,32
28	12,51	1433,61	6,37	16,17	1853,03	8,23
30	12,32	1411,84	6,27	15,68	1796,88	7,98
32	12,11	1387,77	6,16	15,42	1767,09	7,85
34	12,01	1376,31	6,11	15,31	1754,48	7,79
36	11,71	1341,93	5,96	14,92	1709,79	7,59
38	11,3	1294,95	5,75	14,38	1647,90	7,32
40	10,85	1243,38	5,52	13,89	1591,75	7,07
42	10,67	1222,75	5,43	13,72	1572,27	6,98
44	10,51	1204,41	5,35	13,01	1490,91	6,62
46	10,3	1180,35	5,24	12,99	1488,62	6,60
48	10,17	1165,45	5,18	12,02	1377,46	6,12

Jam Ke	KCl (0,01 M)			KCl (0,02 M)		
	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)
0	10,41	1192,95	5,30	15,45	1770,52	7,86
2	10,38	1189,52	5,28	16,00	1833,55	8,14
4	11,35	1300,68	5,78	15,51	1777,40	7,89
6	11,85	1357,97	6,03	15,37	1761,36	7,82
8	12,05	1380,89	6,13	16,18	1854,18	8,24
10	12,36	1416,42	6,29	16,59	1901,16	8,44
12	11,99	1374,02	6,10	15,42	1767,09	7,85
14	12,25	1403,81	6,24	16,16	1851,89	8,23
16	12,61	1445,07	6,42	16,31	1869,08	8,30
18	12,32	1411,84	6,27	16,20	1856,47	8,25
20	12,29	1408,40	6,26	16,48	1888,56	8,39
22	12,36	1416,42	6,29	16,71	1914,92	8,51
24	13,06	1496,64	6,65	17,01	1949,29	8,66
26	12,75	1461,11	6,49	16,27	1864,49	8,28
28	12,41	1422,15	6,32	16,12	1847,30	8,21
30	12,35	1415,27	6,29	15,06	1725,83	7,67
32	12,22	1400,38	6,22	15,11	1731,56	7,69
34	12,11	1387,77	6,16	15,30	1753,33	7,79
36	11,7	1340,78	5,96	14,75	1690,31	7,51
38	11,32	1297,24	5,76	14,31	1639,88	7,28
40	10,17	1165,45	5,18	13,69	1568,83	6,97
42	10,10	1157,43	5,14	13,52	1549,35	6,88
44	10,06	1152,85	5,12	13,12	1503,51	6,68
46	10,17	1165,45	5,18	12,80	1466,84	6,52
48	10,19	1167,74	5,19	12,10	1386,62	6,16

Tabel L.2 Data Pengukuran Arus dan Konduktivitas Pada Pasir MK (Pb : 975 ppm)

Jam Ke	KCl (0,01 M)			KCl (0,02 M)		
	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)
0	11,02	1262,86	5,61	17,92	2053,58	9,12
2	11,95	1369,43	6,08	18,19	2084,52	9,26
4	12,35	1415,27	6,29	17,65	2022,64	8,98
6	12,71	1456,53	6,47	17,51	2006,59	8,91
8	12,60	1443,92	6,41	17,48	2003,16	8,90
10	12,25	1403,81	6,24	17,50	2005,45	8,91
12	11,91	1364,85	6,06	17,31	1983,67	8,81
14	11,52	1320,16	5,86	17,09	1958,46	8,70
16	11,00	1260,57	5,60	17,15	1965,34	8,73
18	11,05	1266,30	5,62	17,17	1967,63	8,74
20	10,28	1178,06	5,23	16,00	1833,55	8,14
22	08,15	933,97	4,15	12,51	1433,61	6,37
24	05,65	647,47	2,88	11,12	1274,32	5,66
26	05,10	584,44	2,60	9,86	1129,93	5,02
28	04,72	540,90	2,40	7,81	895,00	3,98
30	04,45	509,96	2,27	7,31	837,70	3,72
32	04,22	483,60	2,15	6,82	781,55	3,47
34	04,00	458,39	2,04	6,16	705,92	3,14
36	03,81	436,61	1,94	5,92	678,41	3,01
38	03,62	414,84	1,84	5,18	593,61	2,64
40	03,60	412,55	1,83	5,00	572,99	2,55
42	03,51	402,24	1,79	4,72	540,90	2,40
44	03,40	389,63	1,73	4,42	506,52	2,25
46	03,33	381,61	1,69	4,32	495,06	2,20
48	02,92	334,62	1,49	3,95	452,66	2,01

Jam Ke	KCl (0,01 M)			KCl (0,02 M)		
	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)	I (mA)	k (mhos cm ⁻¹)	i (A/m ²)
0	11,12	1274,32	5,66	17,82	2042,12	9,07
2	11,85	1357,97	6,03	18,25	2091,40	9,29
4	12,25	1403,81	6,24	17,57	2013,47	8,94
6	12,69	1454,24	6,46	17,50	2005,45	8,91
8	12,75	1461,11	6,49	17,39	1992,84	8,85
10	12,20	1398,08	6,21	17,42	1996,28	8,87
12	11,79	1351,10	6,00	17,35	1988,26	8,83
14	11,53	1321,30	5,87	17,01	1949,29	8,66
16	11,65	1335,06	5,93	17,12	1961,90	8,71
18	11,07	1268,59	5,63	17,25	1976,80	8,78
20	10,31	1181,50	5,25	16,25	1862,20	8,27
22	8,75	1002,72	4,45	12,37	1417,56	6,30
24	6,01	688,73	3,06	11,21	1284,63	5,71
26	5,25	601,63	2,67	9,92	1136,80	5,05
28	4,65	532,88	2,37	7,93	908,75	4,04
30	4,37	500,79	2,22	7,25	830,83	3,69
32	4,27	489,33	2,17	6,57	752,90	3,34
34	4,06	465,26	2,07	6,17	707,06	3,14
36	3,79	434,32	1,93	5,85	670,39	2,98
38	3,59	411,40	1,83	5,19	594,76	2,64
40	3,29	377,02	1,67	5,06	579,86	2,58
42	3,50	401,09	1,78	4,68	536,31	2,38
44	3,14	359,83	1,60	4,35	498,50	2,21
46	3,09	354,10	1,57	4,31	493,91	2,19
48	2,90	332,33	1,48	3,92	449,22	2,00

Tabel L.3 Laju Fluks, Efisiensi Arus, Koefisien Transfer Massa, dan Efisiensi Penyisihan Pada Dua Media

No	Media	KCl	Rapat Arus (<i>i</i>)	Arus ion Pb	Fluks Pb	Efisiensi Arus	Pb tersisih	Koef. Transp K_L	Efisiensi sistem
		(M)	(A/m ²)	(A/m ²)	mol/dt/m ²		ppm, pasir	(m/det)	(%)
1.a	Tanah	0,01	6,03	0,95	$4,95 \times 10^{-6}$	0,15	323,41	$4,0 \times 10^{-5}$	33,17
1.b	Tanah	0,01	5,90	0,93	$4,84 \times 10^{-6}$	0,15	317,11	$4,0 \times 10^{-5}$	32,52
2.a	Tanah	0,02	7,78	1,81	$9,38 \times 10^{-6}$	0,23	616,29	$2,7 \times 10^{-5}$	63,21
2.b	Tanah	0,02	7,80	1,85	$9,50 \times 10^{-6}$	0,24	628,77	$2,27 \times 10^{-5}$	64,49
3.a	Pasir	0,01	3,87	2,97	$1,54 \times 10^{-5}$	0,77	853,12	$9,89 \times 10^{-6}$	87,50
3.b	Pasir	0,01	3,91	2,98	$1,54 \times 10^{-5}$	0,76	856,82	$9,96 \times 10^{-6}$	87,87
4.a	Pasir	0,02	5,94	3,23	$1,67 \times 10^{-5}$	0,54	920,4	$1,18 \times 10^{-5}$	94,40
4.b	Pasir	0,02	5,95	3,20	$1,65 \times 10^{-5}$	0,53	913,77	$1,19 \times 10^{-5}$	93,72

Tabel L.4 Data Kandungan Pb Dari Hasil Penyisihan (ppm, media)

No	Media	C_0 (ppm)	T (jam)	Di Larutan	Di Katoda	Total
1.a	Tanah	975	48	112,86	210,55	323,41
1.b	Tanah	975	48	111,91	205,20	317,11
2.a	Tanah	975	48	196,29	420,00	616,29
2.b	Tanah	975	48	213,17	415,60	628,77
3.a	Pasir	975	48	332,62	520,50	853,12
3.b	Pasir	975	48	341,42	515,40	856,82
4.a	Pasir	975	48	345,15	575,25	920,40
4.b	Pasir	975	48	333,57	580,20	913,77