

PENERAPAN ELEKTROOSMOSIS UNTUK PENGERINGAN SLUDGE DARI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR

Darmawan^{1*)}, Dyah Tjahyandari Suryaningtyas¹⁾, dan Juniska Muria Sariningpuri²⁾

¹⁾Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB
Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680.

²⁾Alumni S1 Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB

^{*)}Penulis korespondensi: darmawan_soil@yahoo.com

Abstract

APPLICATION OF ELECTROOSMOSIS FOR DEWATERING OF SLUDGE FROM WASTE WATER TREATMENT. *Wastewater treatment produces semi-solid residue (sludge) that must be handled carefully during dumping and discharge to avoid polluting the environment. A low cost and easy treatment of dewatering is needed. This research aimed to apply electroosmosis technique for dewatering sludge in order to seek for parameters that can efficiently reduce water content of sludge, including range of voltage, type of electrodes, and distance between electrodes; and to determine the effect of electroosmosis processes on changes of chemical characteristics of sludge. The results showed that: (1) electroosmosis dewatering occurred on the sludge taken from waste water treatment of landfill but not on sludge from water purification plant (PDAM), (2) direct current voltage of 30 volts was the optimum voltage, (3) copper rod cathode provided electroosmosis process as good as stainless steel cathode and both were better than the woven stainless steel cathode, (4) the dewatering time to reduce 1200% (w/w) water content to about 400% was about 40 hours for sludge of 2500 cm³ in volume (laboratory bench scale), (5) the anode need to reinserted gradually approaching the cathode due to current lost when the water content at the anode point reached 400% and sludge at the point shrink, and (6) some chemical elements in the sludge decreased significantly after treatment.*

Keywords: *dewatering; electroosmosis; sludge; wastewater*

Abstrak

Pengolahan limbah cair menghasilkan residu berupa bahan semi padat yang dikenal sebagai sludge. Sludge tersebut juga perlu dikelola penyimpanan dan pembuangannya agar tidak mencemari lingkungan. Salah satu pengelolaan sludge yang perlu dilakukan adalah pengeringan (dewatering). Salahsatu teknik dewatering yang mungkin diterapkan ialah teknik elektroosmosis, yaitu teknik yang memanfaatkan adanya pergerakan air pada media poros di dalam medan listrik searah. Penelitian ini bertujuan untuk mencari parameter sistem dewatering secara elektroosmosis yang dapat menurunkan kadar air sludge paling efisien dan untuk mengetahui pengaruh elektroosmosis terhadap karakteristik kimia sludge. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: (1) pengeringan sludge terjadi pada jenis sludge IPAL TPA namun tidak pada jenis lumpur PDAM; (2) tegangan listrik searah sekitar 30 volt merupakan tegangan optimum; (3) katoda batang tembaga menghasilkan proses elektroosmosis yang sebanding katoda batang stainless steel dan lebih baik dibanding katoda stainless steel anyam; (4) waktu pengeringan dari kadar air awal 1200% (b/b) hingga kadar air akhir sekitar 400% untuk volume sludge 2500 cm³ (skala laboratorium) sekitar 40 jam; (5) anoda perlu dipindahkan secara bertahap mendekati katoda karena arus terputus pada saat sludge di titik anoda mencapai kadar air sekitar 400% dan mengalami pengerutan; dan (6) kadar beberapa unsur kimia dalam sludge menurun secara signifikan setelah perlakuan.

Kata kunci: *dewatering; elektroosmosis; sludge; limbah*

PENDAHULUAN

Pembuangan limbah baik dari kegiatan domestik maupun industri secara tidak terkendali dapat menyebabkan pengaruh buruk bagi lingkungan.

Terdapat 3 pendekatan dalam penanganan limbah untuk meminimalisasi pengaruh buruk dari unsur-unsur atau senyawa-senyawa dalam limbah yaitu (1) menampung, menyimpan, menumpuk atau menimbun

limbah pada areal yang didesain untuk menahan penyebaran limbah atau unsur-unsur atau senyawa-senyawa limbah yang berbahaya, (2) menurunkan atau menghilangkan kadar unsur-unsur atau senyawa-senyawa limbah yang berbahaya atau membuatnya imobil dan (3) menghilangkan atau mengubah bentuk limbah. Limbah padat dan kering seperti sampah rumah tangga, pasar maupun industri dapat dikelola dengan pendekatan pertama dan ke-tiga tersebut di atas. Sementara itu untuk limbah cair (*sewage*) seperti air buangan pabrik dan rumah tangga, air lindi tempat pembuangan sampah, dan lainnya perlu dikelola dengan pendekatan kedua. Oleh karena itu maka untuk pengelolaan limbah cair ini harus melalui sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL).

Hasil yang diharapkan dari pengolahan limbah cair ialah air yang dapat dialirkan ke perairan umum atau dimanfaatkan untuk berbagai tujuan. Namun demikian pada proses pengolahan limbah cair tersebut akan diperoleh endapan yang semi padat atau lumpur yang kepadatannya sangat bervariasi demikian pula volumenya. Lumpur ini atau yang dikenal sebagai *sludge* tidak dapat dibiarkan menumpuk di kolam pengendapan, karena volumenya akan terus bertambah sehingga kapasitas pengolahan limbah cair akan menurun. Selain itu *sludge* sangat mungkin mengandung unsur-unsur atau senyawa-senyawa yang berbahaya baik berupa atau di dalam partikel atau padatan atau berupa residu cairannya. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan terlebih dulu yang bertujuan membersihkan atau mengurangi *sludge* dari unsur-unsur dan senyawa-senyawa berbahaya, sekaligus mengeringkan *sludge* sebelum pemindahan agar volumenya susut dan lebih mudah diangkut dan ditumpuk (Tuan dkk., 2012a).

Teknologi untuk pengeringan (*dewatering*) dari *sludge* telah banyak dikembangkan, yaitu sentrifusi, pengepresan, penyaringan, dan pembakaran, yang memerlukan peralatan khusus dengan harga dan biaya pemeliharaannya mahal serta kapasitasnya terbatas. Teknologi lain yang mulai dikembangkan yang secara teknis dan ekonomis diprediksi prospektif ialah dengan memanfaatkan fenomena elektroosmosis (Tuan dkk., 2012a; Iwata dkk., 2013). Konsep dasar dari teknologi ini ialah menggiring molekul air yang menjadi bagian dari media porous melalui ruang antar partikel padatan (pori) menggunakan arus listrik dari anoda ke katoda sebagai flux sehingga air terdorong ke luar sistem (Acar dan Alshwabkeh, 1993; Liang, 1976). Arus listrik yang digunakan ialah arus searah dengan voltase rendah sehingga tidak berbahaya dan murah.

Pengembangan teknologi ini mengarah pada pemilihan konstruksi peralatan dan sistem kerja yang paling efisien, melalui pemilihan dan perangkaian elektroda yang awet dan murah, voltase yang sesuai, serta dimensi bak atau kompartemen yang sesuai. Penelitian ke arah ini masih relatif jarang (terutama di Indonesia). Selain aspek teknis yang masih perlu dikembangkan, *dewatering* secara elektroosmosis

masih perlu dikaji ulang sehubungan dengan perubahan-perubahan yang mungkin terjadi terhadap komposisi kimia dan reaktifitas senyawa-senyawa yang masih tertinggal di dalam *sludge* pasca perlakuan pengeringan elektroosmosis tersebut, sebagai contoh Suryaningtyas dkk. (2005) mengungkapkan bahwa elektrokinetik (elektroosmosis dan elektromigrasi) mampu mengurangi kadar beberapa logam berat pada bahan *overburden* dari penambangan batubara.

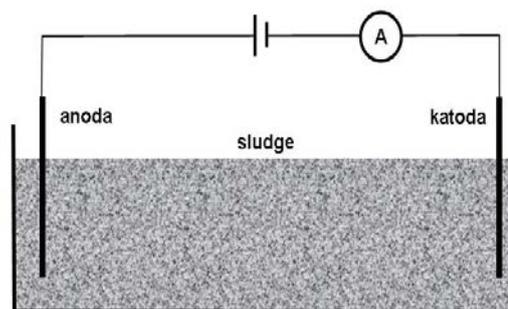
Berdasarkan latar belakang tersebut di atas maka penelitian tentang pemanfaatan fenomena elektroosmosis untuk pengeringan *sludge* penting untuk dilakukan.

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mencari parameter sistem *dewatering* secara elektroosmosis yang dapat menurunkan kadar air *sludge* paling efisien dan untuk mengetahui pengaruh elektroosmosis terhadap karakteristik kimia *sludge*.

METODE PENELITIAN

Secara umum penelitian terdiri dari tahap persiapan bahan dan alat, analisis karakteristik awal *sludge*, perlakuan elektroosmosis terhadap *sludge*, dan analisis karakteristik *sludge* pasca elektroosmosis. Perlakuan elektroosmosis dilakukan secara bertahap, yaitu: (1) perlakuan awal dengan menggunakan pasangan elektroda anoda dan katoda dan voltase yang berbeda dan (2) perlakuan elektroosmosis menggunakan pasangan elektroda terpilih dan *sludge* hasil akhir dianalisis.

Pelaksanaan percobaan elektrosomosis secara prinsip disajikan pada Gambar 1. Contoh *sludge* yang diketahui bobot, kadar air, dan volumenya ditempatkan pada kotak akrilik berukuran 30 x 10 x 10 cm³. Elektroda grafit sebagai anoda ditancapkan pada salah satu ujung *sludge* dan pada ujung sebaliknya ditancapkan elektroda positif. Kedua elektroda dihubungkan dengan sumber arus listrik searah (transformator) melalui suatu ampere meter. Selanjutnya arus listrik searah dengan voltase tertentu, yaitu 20, 30, atau 35 dialirkan selama periode tertentu hingga arus pada ampere meter menurun hingga mendekati nol. Tahap ini tergantung keadaan artinya waktu aliran tergantung perubahan arus, dan elektroda positif (anoda) digeser atau dipindah posisinya mendekati katoda secara bertahap ketika arus mendekati nol.



Gambar 1. Skema rangkaian alat elektroosmosis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik *Sludge* yang Digunakan

Penelitian pengeringan secara elektroosmosis ini dilakukan dengan menggunakan dua jenis *sludge*, yaitu *sludge* dari IPAL TPA dan *sludge* dari tempat pengolahan air minum (PDAM). Karakteristik dari masing-masing *sludge* disajikan pada Tabel 1.

Sludge IPAL TPA mengandung senyawa organik tinggi, yang ditandai dengan kadar C sekitar 10% setara dengan 17-20% bahan organik dengan kadar abu sebesar 61.51%. Sementara itu *sludge* PDAM didominasi oleh partikel-partikel mineral silikat yang halus atau dikenal sebagai partikel *klei/clay* (tidak ditunjukkan pada Tabel 1).

Tabel 1. Karakteristik *sludge* sebelum perlakuan elektroosmosis

Parameter	Jenis <i>sludge</i>	
	IPAL TPA	PDAM
Kadar air (%)	1239	582
pH	7.83	6.43
EC (mS/cm)	3.305	-
C (%)	10.49	0.52
N (%)	1.43	-
S (ppm)	1.12	-
Fe (%)	0.18	101
Mn (ppm)	339.12	418.39
Cu (ppm)	23.22	0.86
Zn (ppm)	24.85	0.05
Ca	0.18%	105.67 ppm
Mg	0.24%	226.40 ppm
Pb (ppm)	9.38	0.04
Cd (ppm)	0.35	0.01
K	1.30%	1.68 ppm
Na	2.36%	12.60 ppm
P	6.36%	28.41 ppm
Kadar abu (%)	61.51	-

Isu penting dari limbah ialah mengenai kadar logam berat, seperti Pb dan Cd kadarnya di bawah 5 ppm kecuali Cu tergolong sangat rendah. Kadar unsur-unsur makro maupun mikro terutama Fe dan Zn untuk *sludge* IPAL TPA jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *sludge* PDAM.

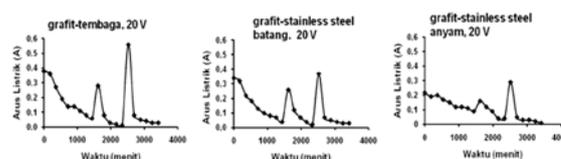
Tabel 1 juga menunjukkan bahwa EC dari *sludge* IPAL TPA lebih besar dibandingkan EC *sludge* PDAM. Hal ini berkaitan dengan komposisinya yang mengandung senyawa organik tinggi, kadar Ca, Mg, K, Na, dan P yang jauh lebih tinggi dari *sludge* PDAM.

Perbandingan Jenis Elektroda dan Voltase

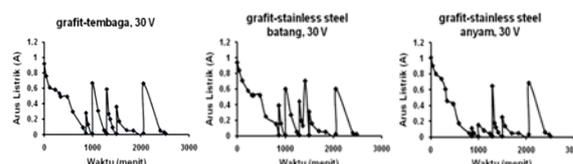
Jenis elektroda yang digunakan dalam elektroosmosis sangat penting karena berpengaruh terhadap besar kecilnya arus yang dapat mengalir. Selain itu jenis elektroda juga perlu dipilih

berdasarkan ketahanannya terhadap korosi akibat perubahan pH yang drastis dari bahan yang diberi perlakuan elektroosmosis. Penelitian Darmawan dan Wada (2002) menunjukkan bahwa grafit merupakan pilihan untuk anoda sedangkan *stainless steel* dan tembaga merupakan pilihan untuk katoda.

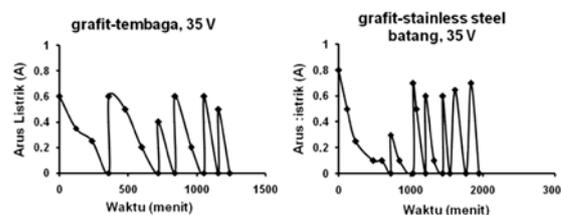
Gambar 2, 3 dan 4 menunjukkan kisaran arus listrik yang mengalir di dalam *sludge* IPAL TPA selama aliran listrik DC sebesar 20, 30 dan 35 volt menggunakan pasangan elektroda yang berbeda. Secara umum arus listrik menurun tajam setelah beberapa jam dari pertama kali elektroda dihubungkan dengan sumber listrik. Ketika arus mendekati nol maka proses elektroosmosis untuk segmen *sludge* antara anoda dan katoda berjalan sangat lambat, sehingga anoda perlu digeser ke titik mendekati katoda. Berdasarkan besarnya arus maksimum yang dapat dicapai maka pasangan anoda batang grafit dan katoda tembaga serta pasangan anoda batang grafit dan batang *stainless steel* keduanya dapat dipertimbangkan sebagai pilihan.



Gambar 2. Perubahan arus listrik (A) pada medium *sludge* pada voltase 20 volt DC pada tiga pasangan elektroda.



Gambar 3. Perubahan arus listrik (A) pada medium *sludge* pada voltase 30 volt DC pada tiga pasangan elektroda



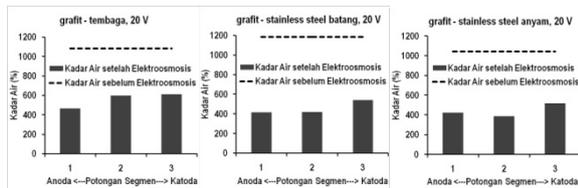
Gambar 4. Perubahan arus listrik (A) pada medium *sludge* pada voltase 35 volt DC pada dua pasangan elektroda

Pilihan jenis elektroda yang digunakan juga dapat didasarkan dari tingkat pengeringan yang dapat diperoleh. Gambar 5, 6, dan 7 menunjukkan perbandingan kadar air akhir setiap potongan *sludge* setelah elektroosmosis menggunakan pasangan elektroda yang berbeda. Percobaan elektroosmosis pada tahap pemilihan pasangan elektroda serta

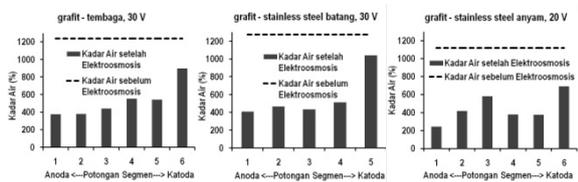
besarnya voltase ini menggunakan hanya satu jenis *sludge* yaitu *sludge* IPAL TPA yang sangat berair yaitu dengan persen kadar air (b/b) sebesar sekitar 1200%. Setelah elektroosmosis pada tiap potongan segmen melintang dari sisi anoda ke arah katoda diketahui bahwa kadar air menjadi sekitar 400-600% kecuali pada bagian yang dekat ke katoda. Hal ini juga dibuktikan dengan keluarnya efluen (*leachate*).

menimbulkan pelumpuran atau leleran yang mengotori.

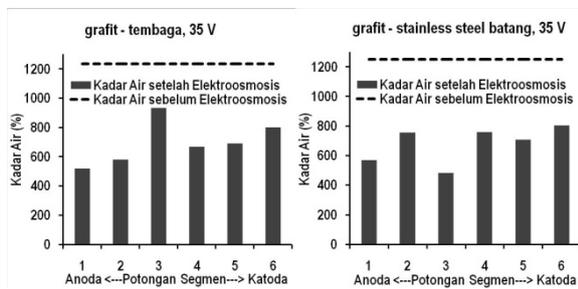
Dari data penurunan kadar air tersebut, dapat juga disimpulkan bahwa dengan menggunakan pasangan elektroda anoda batang grafit dan katoda batang tembaga menghasilkan penurunan kadar air yang lebih tinggi dibanding menggunakan pasangan lain.



Gambar 5. Perubahan kadar air potongan segmen *sludge* setelah elektroosmosis pada voltase 20 volt DC pada tiga pasangan elektroda



Gambar 6. Perubahan kadar air potongan segmen *sludge* setelah elektroosmosis pada voltase 30 volt DC pada tiga pasangan elektroda



Gambar 7. Perubahan kadar air potongan segmen *sludge* setelah elektroosmosis pada voltase 35 volt DC pada dua pasangan elektroda.

Hal pertama yang dapat diinterpretasikan dari penurunan kadar air tersebut, bahwa teknik elektroosmosis mampu mengeringkan *sludge* dari jenis yang didominasi bahan organik namun memiliki EC yang relatif tinggi dan mengandung banyak unsur kation yang menentukan bekerja atau tidaknya proses elektroosmosis. Hasil ini sejalan dengan penerapan teknik elektrokinetik pada pengeringan *sludge* dari limbah industri di Taiwan (Chih dan Cing, 2002).

Kadar air akhir yang dapat diperoleh cukup menurun dibanding kadar air awal. Secara visual dari kondisi melumpur *sludge* berubah menjadi pasta yang relatif kering yang sudah mudah dipindah-pindah menggunakan alat-alat semacam cangkul ataupun sekop dan mudah ditebarkan di lahan terbuka tanpa

Peranan Waktu dan Jarak Antara Anoda dan Katoda

Waktu yang dimaksudkan disini ialah waktu yang diperlukan dari awal aliran listrik hingga arus listrik dihentikan. Arus listrik dihentikan ketika besarnya arus telah mendekati nol, karena ini berarti bahwa aliran listrik tidak efektif lagi untuk menyebabkan terjadinya proses elektroosmosis. Dengan waktu yang sama maka dengan voltase 30 DC dan pasangan elektroda grafit-tembaga dan grafit-batang *stainless steel* diperoleh tingkat pengeringan yang lebih baik.

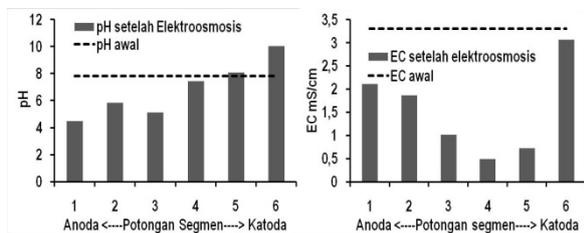
Penilaian peranan waktu yang lain ialah untuk mendapatkan gambaran berapa lama untuk suatu satuan volume atau jarak antara elektroda tertentu. Dalam penelitian skala laboratorium diperlukan waktu 2500 menit untuk mengeringkan masa *sludge* secara elektroosmosis yang berukuran 30 cm, dengan lebar 10 cm dan tinggi 8 cm. Namun perlu digaris bawahi bahwa dalam skala laboratorium atau miniatur ini ternyata anoda harus dipindah tempat secara periodik setiap kali terjadi atau tercapai penurunan arus mendekati nol. Fakta terputusnya arus dan mengharuskan menggeser anoda dengan frekuensi yang tinggi ini merupakan fakta yang jarang dijumpai pada publikasi hasil-hasil penelitian pengeringan bahan secara elektroosmosis.

Perubahan Sifat-sifat Kimia *Sludge* Akibat Perlakuan Elektroosmosis

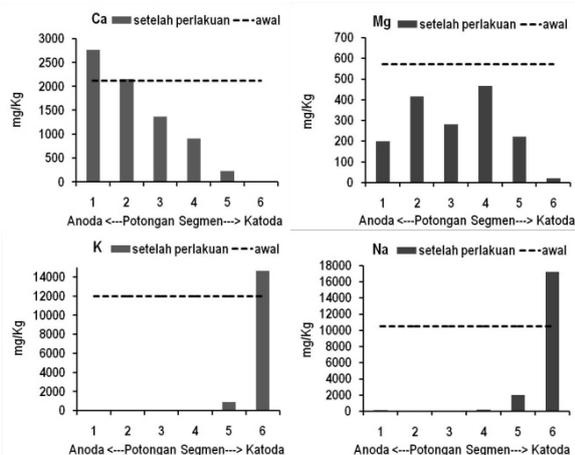
Perubahan sifat *sludge* akibat perlakuan elektroosmosis yang diukur meliputi pH, EC serta kadar unsur-unsur hara terekstrak air dan HCl 25%. Hasil yang disajikan dalam makalah ini adalah kadar unsur-unsur yang terekstrak air, kecuali Pb, Cd dan P yang disajikan dalam Gambar 8 hingga 12.

Data perubahan pH disajikan pada Gambar 8. Dari gambar ini terlihat bahwa perlakuan elektroosmosis yang menyebabkan reaksi elektrolisis air di anoda maupun di katoda menyebabkan pH di anoda menurun secara drastis dan di katoda meningkatkan cukup signifikan. Perubahan pH ini menyebabkan angka-angka ekstrim pH rendah dan tinggi. Hal ini merupakan kelemahan proses elektroosmosis, sehingga perubahan pH ini perlu menjadi bahan pertimbangan. Selain perubahan pH perlakuan elektroosmosis terhadap *sludge* juga menyebabkan perubahan EC. Jika dibandingkan dengan EC awal maka EC *sludge* menurun pada semua segmen kecuali pada potongan segmen yang dekat dengan katoda yang nilainya relatif sama dengan

awal. EC yang masih tinggi pada ujung katoda berkaitan dengan kadar hidroksil yang tinggi dan garam-garam yang menumpuk pada ujung ini.



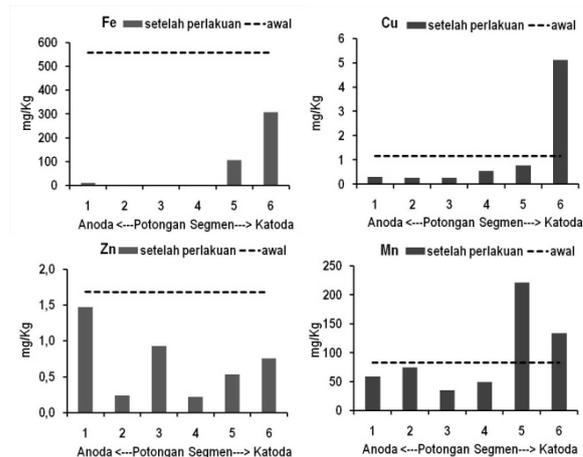
Gambar 8. Perubahan pH dan EC *sludge* IPAL TPA akibat elektroosmosis



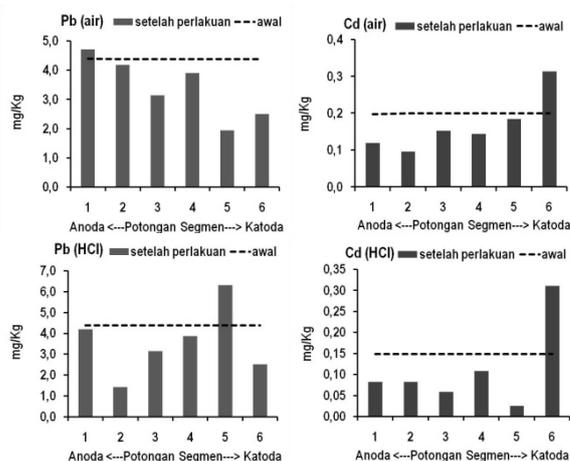
Gambar 9. Perubahan kadar Ca dan Mg, K, dan Na terekstrak air pada *sludge* IPAL TPA akibat perlakuan elektroosmosis

Perubahan kadar Ca, Mg, K, dan Na terekstrak air setelah perlakuan elektroosmosis disajikan pada Gambar 9. Kadar Ca terekstrak meningkat mendekati anoda. Hal ini kontradiktif dengan proses elektromigrasi kation di bawah medan listrik yang seharusnya bergerak menuju katoda untuk keluar dari sistem atau menumpuk dekat katoda. Sementara itu kadar K dan Na terekstrak air setelah perlakuan elektroosmosis jauh lebih kecil dibanding awal kecuali pada ujung katoda dimana terjadi penumpukan karena KOH dan NaOH larut dalam air.

Selanjutnya berdasarkan Gambar 10 dapat dilihat perubahan kadar unsur makro Fe, Mn, Cu dan Zn yang diekstrak dengan air. Kadar awal Fe setelah perlakuan elektroosmosis menurun tajam. Hal ini cukup menguntungkan jika *sludge* pasca elektroosmosis akan digunakan sebagai bahan pembenah tanah. Untuk unsur-unsur mikro Fe dan Zn cukup signifikan menurun sementara Cu dan juga Mn tampak masih menumpuk di ujung katoda, Pergerakan ion-ion yang bermigrasi ke katoda yang bereaksi alkalin akan mengalami imobilisasi melalui reaksi adsorpsi dan presipitasi (Roach dkk., 2009).



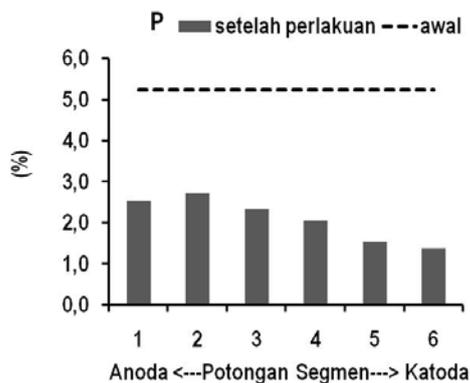
Gambar 10. Perubahan kadar Fe, Cu, Mn, dan Zn terekstrak air pada *sludge* IPAL TPA akibat perlakuan elektroosmosis



Gambar 11. Perubahan kadar Pb dan Cd terekstrak air dan HCl 25% pada *sludge* IPAL TPA akibat perlakuan elektroosmosis

Gambar 11 menunjukkan perubahan kadar logam berat Pb dan Cd yang terkandung dalam *sludge*. Dari gambar tersebut tampak terjadi penurunan yang berarti dari kadar Pb dan Cd baik yang terekstrak oleh air maupun HCl 25%, walaupun masih terlihat penumpukan di katoda. Hal ini menunjukkan bahwa untuk penanganan *sludge* yang mengandung logam berat seperti Pb dan Cd yang tinggi maka bagian ujung katoda perlu ditangani secara khusus.

Gambar 12 menunjukkan perubahan kadar P pada *sludge* akibat perlakuan elektroosmosis. *Sludge* yang digunakan mengandung unsur P yang kemungkinan berupa senyawa fosfat yang cukup tinggi.



Gambar 12. Perubahan kadar P terekstrak HCl 25% pada *sludge* IPAL TPA akibat perlakuan elektroosmosis

Pembuangan limbah ini apa adanya apalagi dalam keadaan melumpur ke tempat-tempat terbuka akan mencemari lingkungan dilihat dari kadar P ini yang jika terlarut ke badan perairan umum akan menyebabkan eutrofikasi. Penurunan kadar yang terjadi akibat elektroosmosis mencapai kira-kira setengah dari kadar awal.

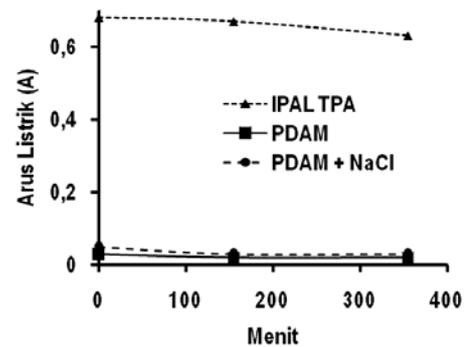
Percobaan Pengeringan Elektroosmosis Terhadap *Sludge* PDAM

Seluruh hasil yang dijelaskan di atas diperoleh dari percobaan menggunakan *sludge* IPAL TPA. Sementara itu percobaan dengan jenis *sludge* yang sama sekali lain, yaitu *sludge* PDAM ternyata tidak menunjukkan hasil yang baik dalam arti tidak terjadi proses elektroosmosis yang diharapkan, ditunjukkan dengan arus listrik yang sangat kecil (Gambar 13). Hal ini disebabkan karena EC dari *sludge* tersebut sangat rendah. Jumlah dan arah aliran elektroosmosis tergantung pada jenis elektrolit (Ahmad dkk., 2006; Tuan dkk., 2012b).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan maka diperoleh beberapa kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian ini, yaitu bahwa pengeringan *sludge* secara elektroosmosis terjadi pada jenis *sludge* IPAL TPA namun tidak pada jenis lumpur PDAM. Tegangan listrik searah 30 volt merupakan tegangan optimum. Katoda batang tembaga menghasilkan proses elektroosmosis yang sebanding dengan katoda *stainless steel* dan lebih baik dibanding katoda *stainless steel* anyam.

Waktu pengeringan dari kadar air awal 1200% hingga kadar air akhir sekitar 400% sekitar 40 jam pada laboratorium. Diperlukan pemindahan anoda secara bertahap karena arus terputus pada saat *sludge* mencapai kadar air sekitar 400%, dan juga akibat *sludge* mengalami pengerutan.



Gambar 13. Perbandingan besar arus pada jarak antar elektroda 25 cm antara perlakuan elektroosmosis pada *sludge* IPAL TPA, PDAM dan PDAM ditambah elektrolit 10 mMol NaCl

Secara umum kadar unsur-unsur dalam *sludge* menurun secara signifikan terutama pada bagian yang jauh dari katoda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Dirjen Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan atas bantuan dana berupa Hibah Fundamental. Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada Pimpinan TPA Bantar Gebang dan Direktur PDAM Tirta Pakuan Kota Bogor atas ijin yang diberikan untuk pengambilan *sludge*.

DAFTAR PUSTAKA

- Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A.N., (1993), Principles of Electrokinetic Remediation, *Environ. Sci. Technol.*, 27, pp. 2638-2647.
- Ahmad, K., Kasim, K.A., and Taha, M.R., (2006), Electroosmotic Flows and Electromigrations During Electrokinetic Processing of Tropical Residual Soils, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 18(2), pp 74-88.
- Darmawan and Wada, S.-I., (2002), Effect of Clay Mineralogy on the Feasibility of Electrokinetic Soil Decontamination Technology, *Applied Clay Science*, 20, pp. 283-293.
- Iwata, M., Tanaka, T., and Jami, M.S., (2013), Application of Electroosmosis for Sludge Dewatering - A Review, *Drying Technology*, 31(2), pp. 170-184.
- Liang, L.-S., (1976), Electroosmotic Dewatering of Wastewater Sludges, *Disertasi*, Massachusetts of Technology, USA.
- Panjaitan, N.H., Rifai, A., Adi, A.D., and Sumardi, P., (2012), The Phenomenon of Electromigration During Electrokinetic Process on Expansive Clay Soil, *IJCEE-IJENS*, 12(4), pp. 47-50.

Roach, N., Reddy, K.R., and Al-Hamdan, A., (2009). Particle Morphology and Mineral Structure of Heavy Metal-Contaminated Kaolin Soil Before and After Electrokinetic Remediation, *Journal of Hazardous Materials*, 165, pp. 548–557.

Suryaningtyas, D.T., Firosoya, A. dan Darmawan, (2005), Pemanfaatan Air Asam Tambang dalam Teknik Elektrokinetik untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Bahan Timbunan Bekas Tambang, *Reaktor*, 9(2), hal.100-106.

Tuan P.A., Isosaari, P., and Sillanpää, M., (2012a). Sewage Sludge Electro-Dewatering Treatment-A Review, *Drying Technology*, 30(7), pp. 691-706.

Tuan P.A., Isosaari, P., and Sillanpää, M., (2012b), Effect of Polyelectrolyte Conditioning and Voltages on Fractionation of Macro and Trace Metals due to Sludge Electro-Dewatering, *Separation Science and Technology*, 47(6), pp. 788-795.

Weng, C. H. and Yuan, C., (2002), Enhancement of Sludge Dewatering: Application of Electrokinetic Technique, *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering*, 12(3), pp. 235-243.