

PENGARUH BEBERAPA JENIS ELEKTRODA UNTUK MENENTUKAN PERPINDAHAN CESIUM-134 di DALAM TANAH MENGGUNAKAN METODE ELEKTROKINETIK

Agus Joko Prasetyo, Eko Hidayanto dan Zaenal Arifin

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

E-mail: agus.prasetyo64@yahoo.com

ABSTRACT

Require to be conducted by impure soil remediasi to shutting-out of Cesium-134 into human being body with elektrokinetik for the purpose of determining transfer of Cesium-134 and influence of electrode type in soil. This research used by three electrode type that is copper, stainless steel, and graphite. Transfer of Cesium-134 contamination divide by three areas there are zone I (0-7,5 cm from anoda), zone II (7,5-22,5 cm from anode) and zona III (22,5-30 cm from anode). From result of transfer of Cesium-134 comntamination and transfer efficiency got one of the electrode type which the best to be used for the sweeping of Cesium-134 contamination. Result transfer of contamination Cesium-134 using three different electrode type have transfer which much the same to that is zone I degradation of concentration, zone II unstable concentration and zone III increase of concentration. For the degradation of copper electrode type electrics current 20.80 mA, steel stainless 23.00 mA, and graphite 15,00 mA. While best electrode type this research is graphite with efficiency at zone III equal to 4,48%, 7,43%, and 9,09%.

Keywords: *Elektrokinetik, Cesium-134, copper, steel stainless, and graphite.*

ABSTRAK

Perlu dilakukan remediasi tanah yang tercemar untuk mencegah masuknya Cesium-134 kedalam tubuh manusia dengan elektrokinetik untuk tujuan menentukan perpindahan Cesium-134 dan pengaruh jenis elektroda didalam tanah. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis elektroda yaitu tembaga, stainless steel, dan grafit. Perpindahan kontaminasi Cesium-134 di bagi menjadi tiga daerah yaitu zona I (0-7,5 cm dari anoda), zona II (7,5-22,5 cm dari anoda) dan zona III (22,5-30 cm dari anoda). Dari hasil perpindahan kontaminasi Cesium-134 dan efisiensi perpindahan didapat salah satu jenis elektroda yang paling baik digunakan untuk pembersihan kontaminasi Cesium-134. Hasil perpindahan kontaminasi Cesium-134 dengan tiga jenis elektroda yang berbeda memiliki perpindahan yang hampir sama yaitu zona I mengalami penurunan konsentrasi, zona II perpindahan konsentrasi tidak stabil dan zona III mengalami kenaikan konsentrasi. Untuk penurunan arus listrik jenis elektroda tembaga 20.80 mA, stainless steel 23.00 mA, dan grafit 15,00 mA. Sedangkan jenis elektroda yang paling baik pada penelitian ini adalah grafit dengan efisiensi pada zona III sebesar 4,48%, 7,43%, dan 9,09%.

Kata kunci : *Elektrokinetik, Cesium-134, tembaga, stainless steel, dan grafit.*

PENDAHULUAN

Tanah yang terkontaminasi bahan Cesium, merupakan salah satu masalah lingkungan yang cukup serius, namun dalam hal ini masih belum tersedia suatu teknologi yang efisien untuk membersihkan tanah dari kontaminasi Cesium. Teknologi pembersih kontaminasi telah dikembangkan dengan model yang cukup sederhana dan meminimalkan penggunaan bahan-bahan kimia, teknologi ini dinamakan Remediasi Elektrokinetik.

Pada penelitian ini akan menggunakan metode elektrokinetik dan bahan kontaminan Cesium-134. Elektroda masuk pada kedalaman 7 cm di atas permukaan tanah untuk

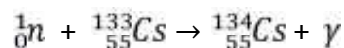
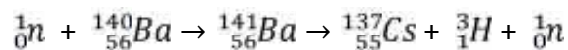
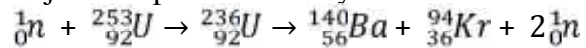
menghubungkan tegangan DC dengan kadar kontaminan yang sama di setiap bagian. Untuk memastikan hubungan optimum tanah dengan elektroda, perlakuan yang harus dilakukan adalah memberikan 70% *water holding capacity (whc)* serta pemberian tegangan 20 volt. Medan listrik yang akan dipakai selama enam hari dengan pencacahan sampel setiap pukul 09.00 dan 15.00. Sedangkan untuk mempelajari faktor yang dapat meningkatkan pergerakan Cesium-134 di dalam tanah maka variasi yang digunakan adalah jenis elektroda. Untuk jenis elektroda yang dipakai antara lain tembaga, *stainless steel*, dan grafit.

TEORI

Cesium-134

Cesium-134 merupakan satu dari tiga jenis radioisotope Cesium yang mendapat perhatian karena memancarkan partikel gamma dan beta dengan waktu paruh 2.05 tahun. Cesium-134 banyak digunakan pada lembaga penelitian. Alasannya karena waktu paruh yang lebih pendek dari Cesium-137, sehingga lebih mudah untuk penanganan limbahnya apabila telah selesai digunakan.

Reaktor nuklir adalah suatu sistem tempat terjadinya reaksi inti yang berupa reaksi fisi berantai yang terkendali. Reaksi yang terjadi sampai terbentuknya Cesium-134.



Cesium yang berasal dari hasil fisi akan masuk ke komponen lingkungan, sehingga akan terakumulasi di dalam komponen lingkungan tersebut. Sifat kimia Cesium mirip dengan Kalium dan Rubidium. Di dalam tubuh makhluk hidup Cesium dimetabolismekan seperti unsur-unsur tersebut [1].

Apabila ada pencemaran Cesium dalam tanah, maka Cesium tersebut akan terikat oleh tanah tersebut. Cesium lebih banyak terikat pada tanah jenis lempung karena tanah jenis ini banyak mengandung mineral tanah, antara lain mika (muskosit, KAlSi_2O_6) dan mineral leusit [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)] yang tersusun dari unsur kalium. Cesium akan berada pada lapisan atas tanah dan akan terikat sangat kuat kepada partikel tanah, sehingga dapat memungkinkan tidak bisa terserap oleh akar tanah [2].

Proses dan Mekanisme Remediasi Elektrokinetik

Elektrokinetik merupakan suatu proses yang sangat sederhana. Dua elektroda diletakkan di dalam tanah dengan kuat arus searah yang dilewatkan di antara keduanya sehingga elektrode tersebut dibedakan menjadi katode dan anode. Arus searah ini melewati tanah yang

menghasilkan area kecil dimana ion-ion dapat berpindah.

Ketika arus DC digunakan pada elektrode, dihasilkan tanah yang terpengaruh medan listrik oleh katode dan anode sehingga menyebabkan kation cenderung untuk berpindah ke arah katode bermuatan negatif dan anion berpindah ke arah anode bermuatan positif. Pada proses terakhir dari Remediasi Elektrokinetik, ion-ion yang dipekatan/dipadatkan tersebut akan mendekati elektrode atau mengalami reaksi pada elektrode, di mana logam-logam pencemar tersebut naik ke arah elektrode atau melepaskan komponen berbentuk gas. Perubahan pH karena pengaruh arus merupakan reaksi elektrolisis pada elektrode. Terjadi oksidasi air pada anode dan menghasilkan ion-ion hidrogen (H^+). Ion-ion H^+ tersebut membangkitkan asam untuk berpindah menuju katode. Sebaliknya, reduksi air terjadi pada katode dan menghasilkan ion-ion hidroksil (OH^-) yang kemudian berpindah sebagai dasar ke arah anode [3].

METODE PENELITIAN

Menentukan Water Holding Capacity (whc) yang dipakai

Pada penelitian ini digunakan tiga jenis elektroda yang berbeda yaitu tembaga (160 mm, 100 mm, 2 mm), *stainless steel* (160 mm, 100 mm, 2 mm), grafit (160 mm, 100 mm, 4 mm). Penelitian ini dimulai dengan mengayak tanah sehingga diperoleh ukuran tanah yang homogen. Setelah itu tanah dipanaskan hingga massanya jenuh, kemudian tanah sebanyak 2 kg diletakkan dalam wadah aquarium yang terdapat elektroda berbahan jenis tembaga yang sudah terangkai dengan alat listrik. Prosedur selanjutnya, air 200 ml dituangkan pada wadah aquarium sampai merata dan memberi beda potensial awal sebesar 5 volt, sehingga arus yang mengalir dapat dicatat. Variasi tegangan yang digunakan adalah 5, 10, 15, 20, dan 25 volt. Kemudian variasi air dari 200 ml sampai 1450 ml dengan rentang penambahan tiap 100 ml air. Setelah selesai, mengulangi prosedur penelitian dengan mengganti elektroda

berbahan jenis *stainless steel* dan grafit. Setelah semua perlakuan selesai dapat dianalisis *water holding capacity (whc)* optimum pada tiap elektroda.

Menentukan Distribusi Pergeseran Cesium-134

Sampel tanah 2 kg yang sudah terkontaminasi cesium 134 diletakkan kedalam wadah aquarium yang telah dipasang elektroda tembaga dan diberikan tanda garis. Tanda garis ini digunakan untuk menandai daerah yang akan dicacah dengan penomoran I-XI (dengan jarak tiap nomor 2,5 cm). Sampel tanah yang berada dalam wadah dicacah. Hal ini bertujuan untuk mengetahui homogenitas cesium 134 di dalam tanah. Setelah sampel tanah selesai dicacah, langkah selanjutnya adalah menyusun rangkaian seperti gambar 3.10 dan diberikan tegangan DC sebesar 20 Volt selama 6 x 24 jam sehingga cesium 134 dapat bergerak dari anoda ke katoda. Pada saat pukul 09.00 dan 15.00 sampel tanah dari I-XI mulai dicacah menggunakan spektrometer gamma dengan detector NaI(Tl) dan diulangi sampai hari ke enam. Setelah pencacahan selesai, melakukan pengujian dengan cara yang sama untuk *stainless steel* dan grafit.

Data yang didapat kemudian dianalisa dengan cara melihat hasil cacahan pada tiap segmen (I sampai XI), Untuk mengkonversi nilai $A_{0\text{sampel}}$ (cps) menjadi A_0 (Bq) digunakan persamaan :

$$A_{0\text{sp}} \text{ Bq} = \frac{k \times C_{\text{pssp}} \times A_{0\text{st}} \text{ Bq} \times t_{\text{p}}}{C_{\text{pst}}} \quad (1)$$

Sedangkan Untuk menentukan tingkat efisiensi penurunan konsentrasi Cesium-134 pada tanah yang setelah dilakukan remediasi secara elektrokinetik adalah dengan menggunakan persamaan sebagai berikut[4]:

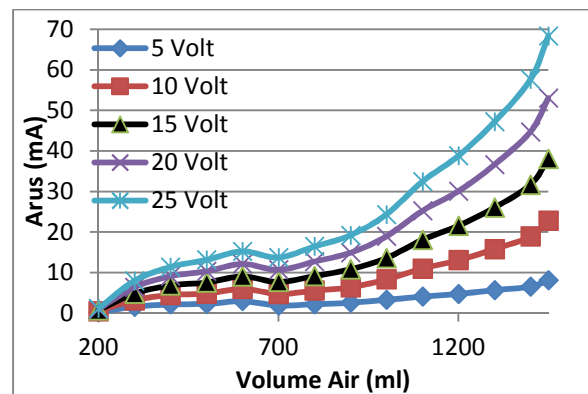
$$E = \frac{A_{\text{akhir}} - A_{\text{awal}}}{A_{\text{awal}}} \times 100\% \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

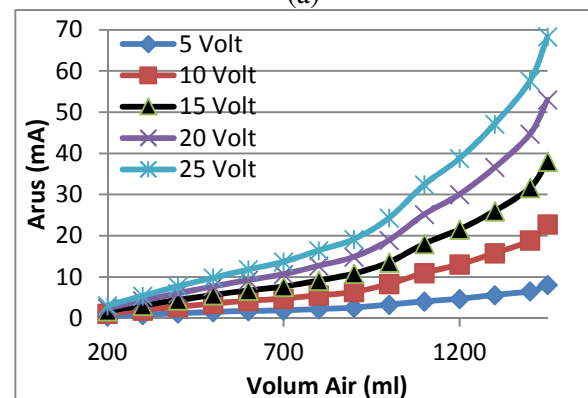
Penentuan *Water Holding Capacity (whc)*

Pada pengujian 200 gram tanah andisol dari lembang memiliki *water holding capacity (whc)* 100% sebesar 145 ml. Maka pada

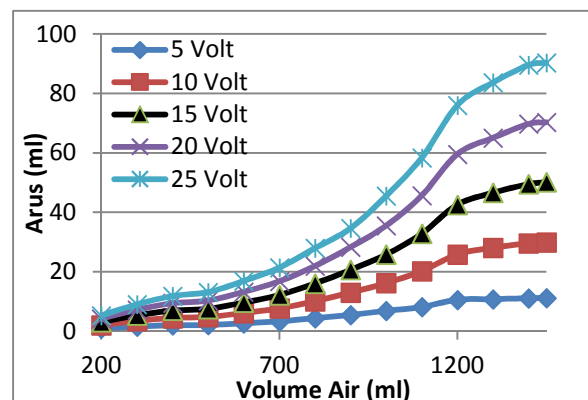
pengujian 2000 gram tanah ini mempunyai *water holding capacity (whc)* 100% sebesar 1450 ml. Sehingga, grafik hubungan antara penambahan volume air terhadap kuat arus pada tegangan 5-25 volt dapat dilihat dibawah ini.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. Grafik hubungan antara penambahan air terhadap kuat arus pada elektroda (a) tembaga, (b) *stainless steel*, (c) Grafit.

Dari ketiga grafik diatas terdapat hubungan dimana setiap penambahan 100 ml maka arus yang dihasilkan semakin meningkat dan berbanding lurus. Tetapi hampir di setiap jenis elektroda pada penambahan air dari 1100 ml ke 1200 ml arus listrik mulai jenuh dan menandakan kontak optimum antara elektroda dan tanah berkisar antara 1000 sampai 1100 ml air atau setara dengan *water holding capacity* (*whc*) 68.96% sampai 75.86%.

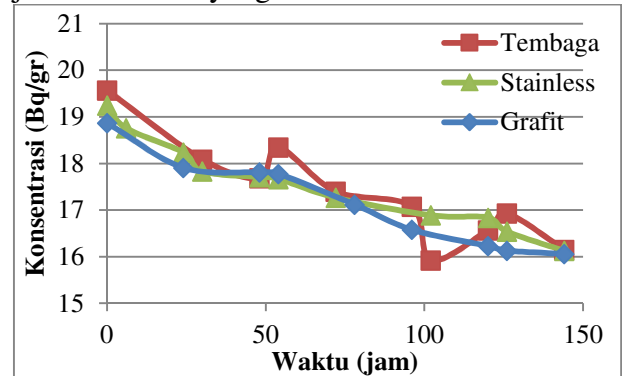
Untuk memastikan hubungan optimum elektroda dengan tanah dibutuhkan *water holding capacity* (*whc*) sebesar 70% [5]. Sehingga pada penentuan ini digunakan perhitungan manual dimana hasil perhitungan *water holding capacity* (*whc*) 70% untuk tanah andosol adalah 1015 ml. Sedangkan tegangan yang digunakan adalah 20 volt dimana pada tegangan ini arus cenderung stabil dan besar arus yang dihasilkan dengan 25 volt tidak begitu jauh. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, pengasaman dalam daerah anoda dan alkalisasi di daerah katoda yang dianggap berasal dari generasi ion H^+ dan OH^- dari air elektrolisis dengan perlakuan pengaliran arus DC[6],[7].

Pada penelitian remediasi tanah dengan metode elektrokinetik digunakan sampel tanah andisol yang merupakan tanah paling subur dimana tanah ini mengandung 32.19% liat halus yang sangat bagus untuk kontak dengan arus listrik serta ukurannya yang berdiameter kurang dari 0.7 mm sehingga memudahkan untuk proses pengayaan. Bahan lain yang digunakan adalah tiga jenis elektroda yang berbeda yaitu tembaga (160 x 100 x 2 mm), *stainless steel* (160 x 100 x 2 mm), dan grafit (160 x 100 x 4 mm). Karena sel elektrokinetik merupakan sistem tertutup, maka selama proses berlangsung diasumsikan kandungan Cesium-134 sama. Aspek yang dilihat dari penelitian ini adalah persebaran Cesium-134 didalam tanah, arus yang di dapat setelah perlakuan enam hari, dan hasilnya dapat ditarik kesimpulan jenis elektroda yang paling baik digunakan untuk remediasi tanah dengan metode elektrokinetik.

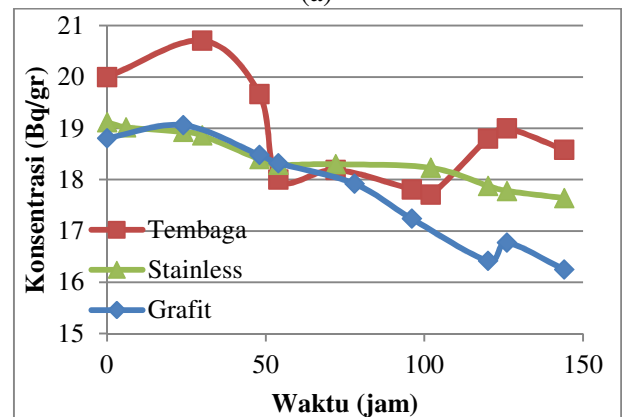
Perpindahan Cesium-134 dalam tanah pada tiap zona

Zona I (0 sampai 7,5 cm dari anoda)

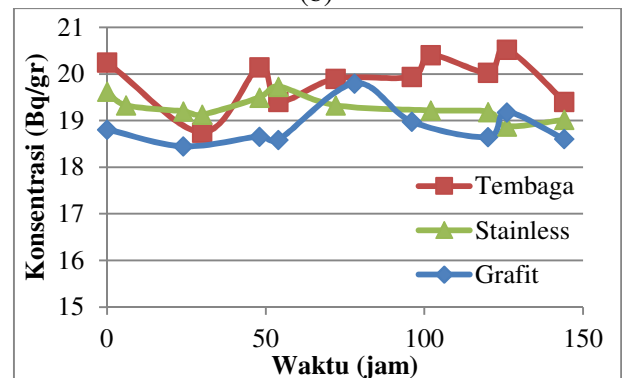
Dari grafik di bawah ini dapat dilihat hasil dari pergerakan Cesium-134 di dalam tanah selama enam hari dengan menggunakan tiga jenis elektroda yang berbeda.



(a)



(b)



(c)

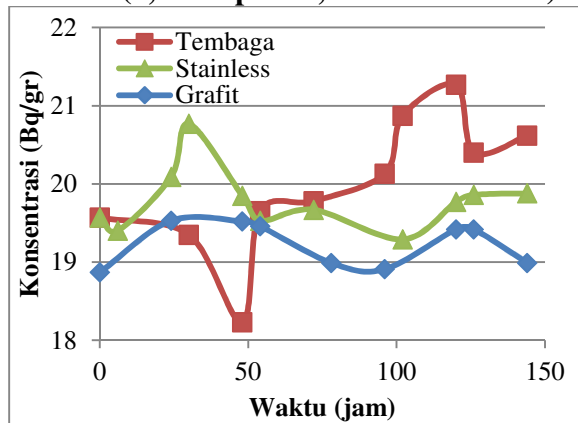
Gambar 4. Laju perpindahan Cesium-134 didalam tanah selama enam hari pada jenis elektroda tembaga, *stainless steel*, dan grafit pada (a) segmen I, (b) segmen II, dan (c) segmen III.

Dari gambar 3 dapat diamati bahwa penurunan konsentrasi dari tiap-tiap jenis elektroda berbeda-beda. Dimana pada jenis

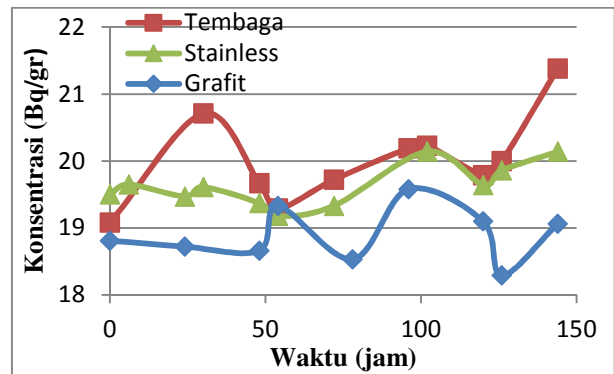
elektroda tembaga terjadi penurunan konsentrasi Cesium-134 yang signifikan pada waktu 30 jam di segmen I dan III, sedangkan pada waktu 30 jam di segmen II mengalami peningkatan sebesar 0.71 Bq/gr. Hal ini disebabkan adanya perpindahan Cesium-134 dari segmen I. Sedangkan untuk jenis elektroda *stainless steel* dan grafit hampir di setiap waktu mengalami penurunan konsentrasi yang stabil meskipun pada jenis elektroda grafit pada waktu 24 dan 126 jam di segmen II mengalami kenaikan konsentrasi Cesium-134 sebesar 0.25 Bq/gr dan 0.35 Bq/gr. Namun, pada keseluruhan proses cenderung menurun (gambar grafik 4 (b)).

Pada segmen III hampir semua jenis elektroda mengalami penurunan yang kurang stabil. Hal ini dapat dilihat pada gambar grafik 3.4 (c), dimana ketidak stabilan ini dikarenakan adanya perpindahan muatan Cesium-134 dari segmen I dan II ke segmen III dan pengaruh medan listrik dari anoda yang kecil serta pengaruh medan listrik dari katoda, sehingga muatan-muatan yang ada di dalam tanah bergeser dan akibatnya konsentrasi Cesium-134 juga berpindah.

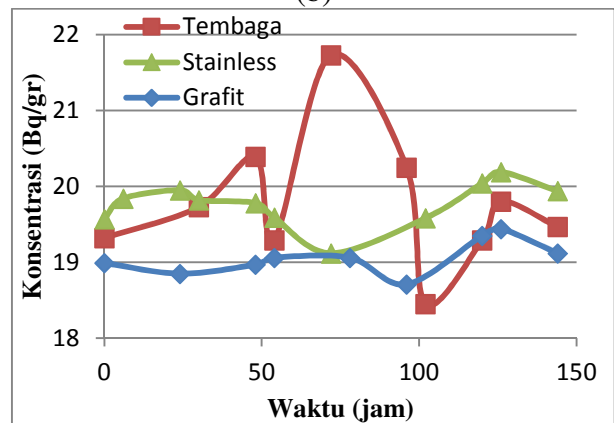
Zona II (7,5 sampai 22,5 cm dari anoda)



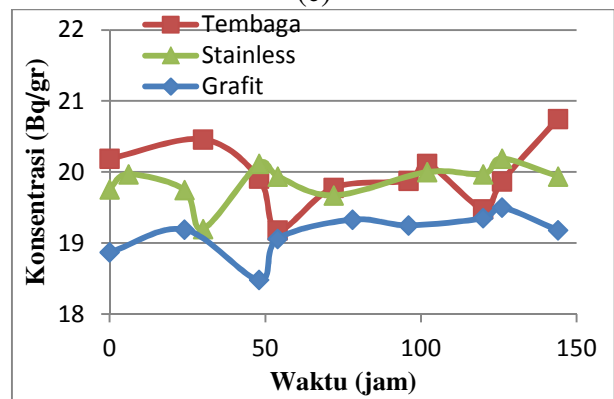
(a)



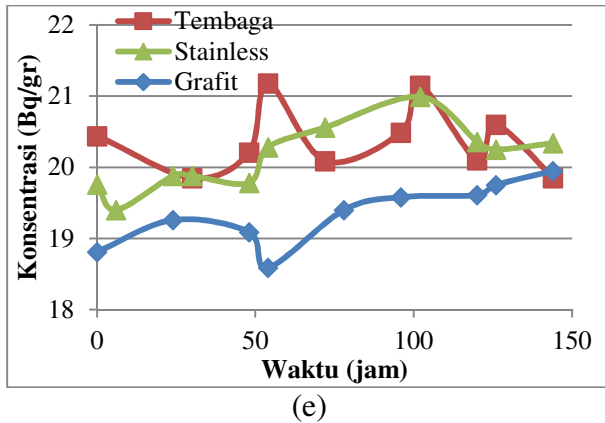
(b)



(c)



(d)



Gambar 4 Laju perpindahan Cesium-134 di dalam tanah selama enam hari pada jenis elektroda tembaga, *stainless steel*, dan grafit pada (a) segmen IV, (b) segmen V, (c) segmen VI, (d) segmen VII, dan (e) segmen VIII.

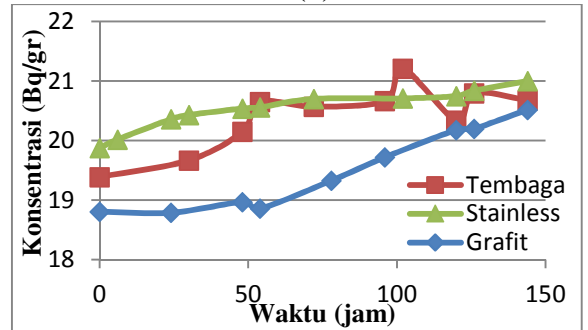
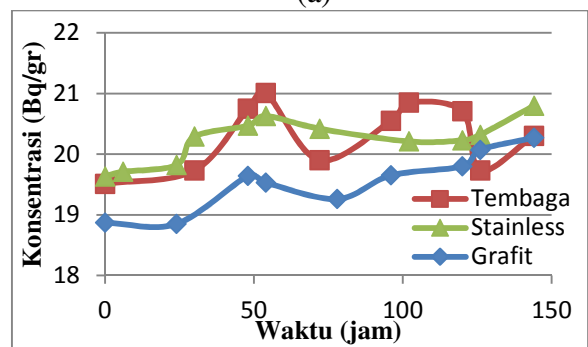
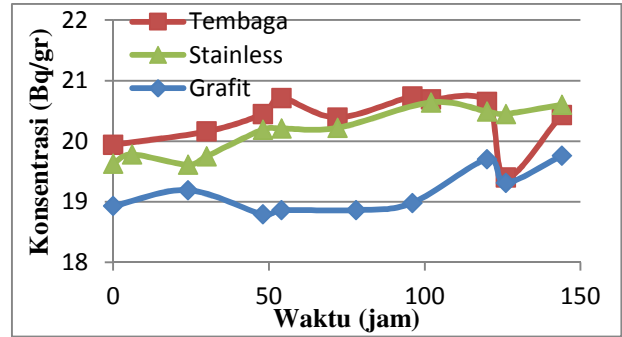
Pada gambar 4 ini menggambarkan perpindahan Cesium-134 terlihat tidak stabil. Hal ini disebabkan pengaruh medan listrik dari kedua elektroda (anoda dan katoda) sehingga mengakibatkan muatan Cesium-134 di dalam tanah berpindah ke kanan dan ke kiri. Dari laju konsentrasi terhadap waktu dapat diamati bahwa pada waktu 0 sampai 144 jam untuk semua jenis elektroda mengalami sedikit kenaikan.

Pergerakan tidak stabil ini juga disebabkan oleh adanya gerakan air yang terjadi dalam tanah (elektroosmosis) dan gerakan partikel bermuatan atau koloid dalam medan listrik (elektroforosis), sehingga mengakibatkan gerakan air di dalam tanah ini membawa ion-ion. Pada zona ini polarisasi (pengkutuban muatan) listrik juga berperan besar dimana muatan negative yang terkandung di dalam tanah akan bergerak ke kutub positif begitu pula sebaliknya muatan positif akan bergerak ke kutub negative.

Zona (22,5 sampai 30 cm dari anoda)

Pada gambar 5 merupakan laju peningkatan secara terus menerus dari waktu 0 sampai 144 jam perpindahan Cesium-134 di dalam tanah. Peningkatan konsentrasi ini akibat dari perpindahan Cesium-134 yang cenderung menuju katoda karena memiliki kelebihan satu

muatan positif dan akibat medan listrik di dekat katoda.



Gambar 5 Laju perpindahan Cesium-134 di dalam tanah selama enam hari pada jenis elektroda tembaga, *stainless steel*, dan grafit pada (a) segmen IX, (b) segmen X, dan (c) segmen XI.

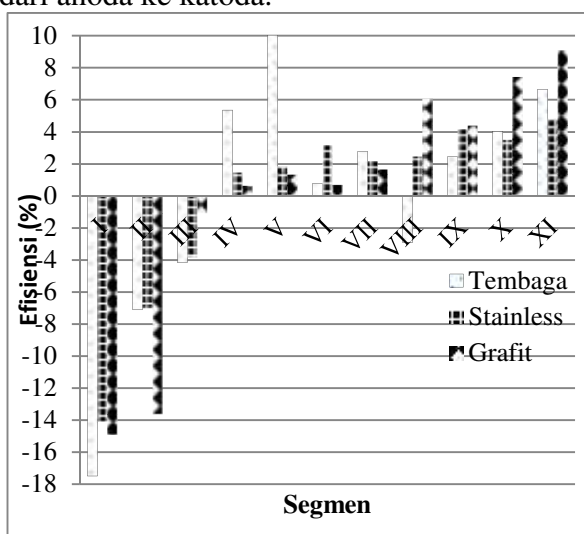
Pada gambar 5 (a) dapat dilihat laju peningkatan konsentrasi Cesium-134 belum terlihat jelas. Hal ini dikarenakan pengaruh medan listrik dari katoda yang kecil dan adanya pengaruh medan listrik dari anoda. Sedangkan pada gambar 5 (b) dan (c) sudah terlihat kenaikan konsentrasi Cesium-134 yang cukup besar. Namun, pada jenis elektroda tembaga kenaikan konsentrasi Cesium-134 tidak begitu

stabil setelah melewati waktu 54 jam. Hal ini dikarenakan mulai terjadi korosi pada tembaga yang mengakibatkan arus listrik yang dihasilkan berkurang sehingga medan listrik semakin kecil.

Efisiensi pergerakan Cesium-134

Dari pergerakan Cesium-134 dapat diketahui nilai efisiensi pergerakan konsentrasi Cesium-134 setelah dilakukan remediasi elektrokinetik selama enam hari, yaitu dapat disajikan pada gambar 6.

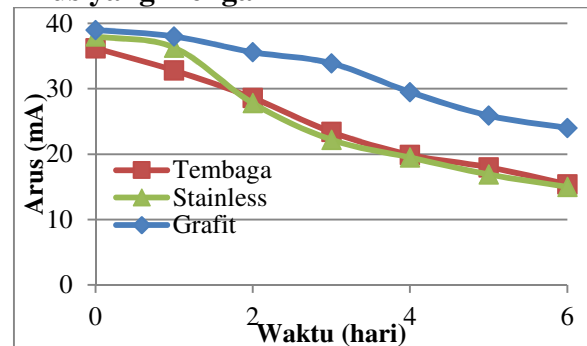
Gambar 6 dapat dilihat sebagai pergerakan Cesium-134 dalam tanah setelah remediasi elektrokinetik pada tiap jenis elektroda. Dimana tiap elektroda terjadi penurunan pada segmen I, II, III. Masing-masing penurunan sebesar 17,48%, 7,10%, 4,15% untuk elektroda jenis tembaga, 14,08%, 7,01%, 3,82% untuk elektroda jenis *stainless steel* dan 14,89%, 13,61%, 1,06% untuk elektroda jenis grafit. Sementara persentase efisiensi pada segmen IX, X, XI mengalami kenaikan sebesar 2,46%, 3,05%, 6,65% untuk elektroda jenis tembaga, 4,18%, 3,52%, 4,83% untuk elektroda jenis *stainless steel* dan 4,38%, 7,42%, 4,15% untuk elektroda jenis grafit. Penurunan dan kenaikan konsentrasi Cesium-134 disebabkan oleh perpindahan Cesium-134 dari anoda ke katoda.



Gambar 6 Efisiensi konsentrasi Cesium-134 tiap segmen pada elektroda tembaga, *stainless steel*, grafit.

Pada segmen IV, V, VI, VII, dan VIII perpindahan konsentrasi Cesium-134 tidak stabil. Dimana pada jenis elektroda tembaga, efisiensi tertinggi pada rentang segmen III sampai VIII terdapat pada segmen V sebesar 12,05% dan efisiensi terendah pada segmen VIII sebesar -2,89% (turun 2,89%). Pada jenis elektroda *stainless steel* dan grafit kenaikan konsentrasi antara 1,48% sampai 3,17% untuk elektroda jenis *stainless steel* dan 1,48% sampai 4,18% untuk elektroda grafit.

Arus yang mengalir



Gambar 7. Laju arus listrik pada jenis elektroda tembaga, *stainless steel*, dan grafit selama enam hari.

Pada perbandingan laju arus listrik terhadap waktu pada gambar grafik 7 dapat dilihat bahwa ketiga jenis elektroda cenderung mengalami penurunan arus listrik. Perbedaan dari ketiganya hanya pada besarnya penurunan arus listrik DC. Dimana pada gambar 7 dapat diamati perubahan arus listrik selama enam hari paling rendah terjadi pada jenis elektroda grafit yaitu 39,00 mA menjadi 24,00 mA atau turun 15,00 mA selama enam hari. Sedangkan penurunan arus listrik pada jenis elektroda tembaga dan *stainless steel* hampir sama yaitu dari 36,20 mA menjadi 15,40 mA dan 38,00 mA menjadi 15,00 mA atau masing-masing turun 20,80 mA dan 23,00 mA selama enam hari.

Penurunan arus listrik terjadi diakibatkan perpindahan Cesium-134 ke katoda yang mengakibatkan hambatan listrik sistem meningkat. Sedangkan untuk perbedaan

penurunan arus listrik diakibatkan jenis elektroda tembaga dan *stainless steel* terjadi korosi dan menghasilkan ion Cu^+ untuk tembaga dan ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} . Karena arus yang dihasilkan semakin kecil maka pergerakan Cesium-134 juga akan menurun.

Dari hasil di atas didapat elektroda jenis grafit yang paling baik karena jenis elektroda ini memiliki tingkat korosi yang rendah, tidak menghasilkan ion karbon, merupakan konduktor yang baik hal ini terlihat pada saat pengujian *water holding capacity* serta hasil persentase efisiensi pada zona III paling tinggi.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, ketiga jenis elektroda memiliki kecenderungan yang sama yaitu konsentrasi Cesium-134 pada zona I cenderung menurun, konsentrasi Cesium-134 pada zona II tidak stabil dan konsentrasi Cesium-134 pada zona III meningkat dan dari ketiga jenis elektroda yang diujikan, elektroda jenis grafit paling baik digunakan dengan efisiensi pada zona III sebesar 4,48%, 7,43%, dan 9,09%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Setiawati, E., Arif I., Tjahaja P., 2004. *Studi Distribusi Radionuklida ^{134}Cs pada Sistem Perairan Tawar*. ISSN: 1410 -9662 Vol. 7, No. 2, hal 35 – 39.
- [2] Muharini, A., 1998, *Model Dinamik untuk Penyerapan ^{134}Cs Dalam Tanah oleh Tanaman Paksoi (*Brassica rapa*)*, [Tesis], Magister Teknik Lingkungan ITB, Bandung.
- [3] Acar, Y. B., Hamed. J. T., 1990, *Research Record: National Research Council: Washington DC*, vol. 1312, p. 153.
- [4] Tjahaja, P., Suhulman., Sukmabuana, P, Ruchijat. 2003. *Studi Awal Fitoremediasi Lingkungan Perairan Tawar: Penyerapan Radiocesium Oleh Tanaman Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*)*. Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir P3TM-BATAN. Yogyakarta. 8 Juli 2003.
- [5] Cang L., Wang Q.Y., Zhoua D.M., Xu H., 2011, *Effects of electrokinetic-assisted phytoremediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by Indian mustard*, Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China.
- [6] Aboughalma H., Bi R., Schlaak M., 2008, *Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants*, J. Environ.Sci. Heal.926–93.
- [7] O'Connor C.S., Lepp N.W., Edwards R., 2003, *The combined use of electrokinetic remediation and phytoremediation to decontaminated metal-polluted soils: a laboratory-scale feasibility study*, Environ.