

BAB IV

HASIL PENELITIAN dan PEMBAHASAN

Tanah merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia, tetapi keberadaan tanah yang dulunya sebagai lahan bercocok tanam kini dijadikan media pembuangan hasil sampingan industri. Mulai dari perkembangan industri, pembuangan sisa-sisa makanan sampai dengan penggunaan bahan-bahan kimia dan pestisida bagi pertanian ternyata memberikan kontribusi negatif yang cukup besar dan akhirnya menimbulkan pencemaran. Berikut ini merupakan bahan-bahan berbahaya yang dapat ditemukan pada tanah.

Tabel 4.1. Bahan-Bahan Pencemar Beserta Sumber Pencemar yang Terdapat dalam Tanah

PERINGKAT	PENCEMAR	SUMBER PENCEMAR
1	Trichloroethylena	Cucian dan industri logam
2	Timah Hitam	Bensin, pertambangan dan bahan-bahan konstruksi
3	Tetrachloroethylena	Cucian dan industri logam
4	Benzen	Bensin dan industri
5	Toluena	Bensin dan industri
6	Chromium	Industri pelapisan logam
7	Methylene Clorida	Industri cat, bahan-bahan pelarut
8	Zinc	Pertambangan dan industri
9	1,1,1-tricloroethana	Logam dan plastik
10	Arsenic	Pertambangan dan industri
11	Chloroform	Bahan-bahan pelarut
12	1,1-dicloroethana	Bahan-bahan pelarut
13	1,2-dicloroethana	Perpindahan produk dari 1,1,1-tricloroethana

14	Cadmium	Pertambangan dan Industri pelapisan
15	Mangan	Industri, pertambangan dan oksida alam
16	Tembaga	Industri dan pertambangan
17	1,1-dichlorethana	Industri
18	Vinyl Clhorida	Plastik dan industri
19	Barium	Industri dan produksi energi
20	1,2-dichlorethana	Industri logam dan industri cat
21	Ethyl Benzena	Bensin, styrene dan Industri aspal
22	Nickel	Industri dan pertambangan
23	Di (2- ethylhexy) pthalat	Industri plastik
24	Xylena	Bahan-bahan Pelarut dan bensin
25	Phenol	Pengolahan kayu dan obat-obatan

Sumber , Contaminants found at hazardous waste site (NRC, 1999)

Melihat fenomena ini, maka perlu dilakukan sebuah upaya untuk mengurangi beban pencemaran dengan cara remediasi elektrokinetik. Remediasi elektrokinetik merupakan pemulihan tanah terkontaminasi logam berat dengan menggunakan tegangan listrik rendah dan arus DC (*direct current*).

Sebelum dilaksanakan penelitian remediasi elektrokinetik pada tanah yang tercemar logam berat kadmium, terlebih dahulu dilaksanakan percobaan dengan tanah tercemar logam krom. Tujuannya adalah untuk mengetahui mekanisme remediasi elektrokinetik, yaitu mulai dari pemasangan kabel elektroda, pengukuran pH, pengukuran resistensi, pengambilan sampel sampai perubahan-perubahan yang terjadi selama proses remediasi elektrokinetik berlangsung dan untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada lampiran I.E.

Tanah yang digunakan adalah tanah kaolinit yang berasal dari Godean yang kemudian dicampur dengan CdSO_4 sampai konsentrasinya mencapai 289 mg/kg

(lampiran II). Penelitian ini akan dibahas pH, resistensi, penurunan konsentrasi kadmium dan batang katoda.

4.1. Hasil Analisis pH Pada Area Efektif.

Penelitian ini dibagi dalam beberapa area yang dapat dilihat pada gambar 3.5, yaitu area efektif dan area inefektif. Untuk lebih rincinya dapat dilihat dibawah ini.

- a. Area I : terletak 15 cm dari katoda
- b. Area II : terletak 10 cm dari katoda
- c. Area III : terletak 5 cm dari katoda
- d. Area IV : terletak 15 cm dari anoda

Area efektif merupakan area yang berada pada anoda, yaitu area I, II dan III, sedangkan area inefektif berada pada area diluar anoda, yaitu area IV. Pengukuran pH dilakukan setiap 3 jam sekali pada masing- masing area menggunakan pH meter tanah. Hasil pengukuran pH selama proses remediasi elektrokinetik dapat dilihat pada tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2. Hasil pengukuran pH pada area I

Waktu ke- (jam)	Titik Pengukuran	pH	pH rata-rata
0	Awal	4,8	4,8
3	A1	7,2	7,1
	D1	7	
6	A1	7,4	7,5
	D1	7,6	
9	A1	7,8	7,9
	D1	8	
12	A1	9	9
	D1	9	



Tabel 4.3. Hasil pengukuran pH pada area II

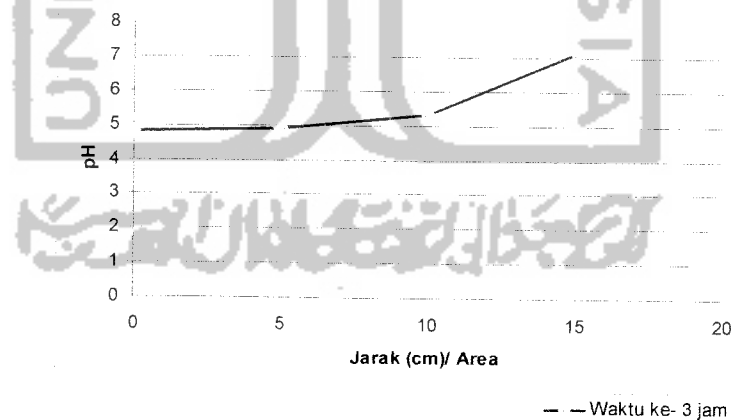
Waktu ke- (jam)	Titik Pengukuran	pH	pH rata-rata
0	Awal	4,8	4,8
3	F2	5,4	5,3
	B2	5,2	
6	F2	6,2	5,6
	B2	5	
9	F2	5,6	5,9
	B2	6,2	
12	F2	6	6,1
	B2	6,2	

Tabel 4.4. Hasil pengukuran pH pada area III

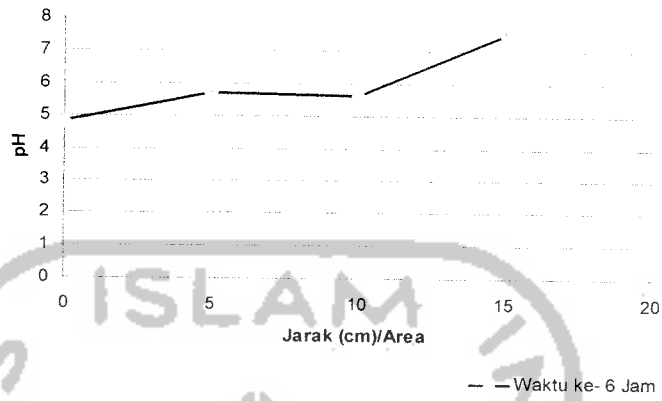
Waktu ke- (jam)	Titik Pengukuran	pH	ph rata-rata
0	Awal	4,8	4,8
3	C3	5,2	4,9
	E3	4,6	
6	C3	6	5,7
	E3	5,4	
9	C3	5,8	5,7
	E3	5,6	
12	C3	6	5,9
	E3	5,8	

Dari hasil pengukuran diperoleh pH awal tanah tercemar logam kadmium sebesar 4,8. Pada 3 jam pertama pH di area I sebesar 7,1, area II pH terukur lebih kecil yaitu sebesar 5,3 dan area III nilai pH sebesar 4,9. Pengukuran pH pada waktu 6 jam area I mengalami peningkatan yang tidak signifikan menjadi 7,5, di area II juga mengalami peningkatan yang tidak terlalu signifikan menjadi 5,6 dan kenaikan pH juga terjadi pada area ke III yaitu 5,7. Pada pengukuran pH 9 jam, pH tiap-tiap area terus meningkat, tetapi pada area III nilainya konstan seperti pada pengukuran pH 6 jam yaitu sebesar 5,7. Pengukuran pH pada 12 jam terlihat area I memiliki peningkatan yang sangat besar yaitu menjadi 9 dan terlihat di area II dan III peningkatan yang tidak terlalu mencolok, yaitu menjadi 6,1 dan 5,9.

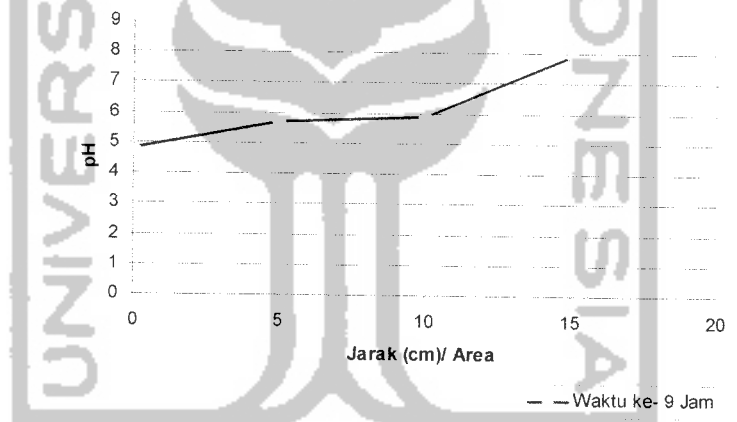
Dari tabel 4.2 sampai 4.4 dapat dibuat grafik hubungan antara pH dengan jarak (area) seperti yang terlihat pada gambar 4.1 sampai 4.4 di bawah ini.



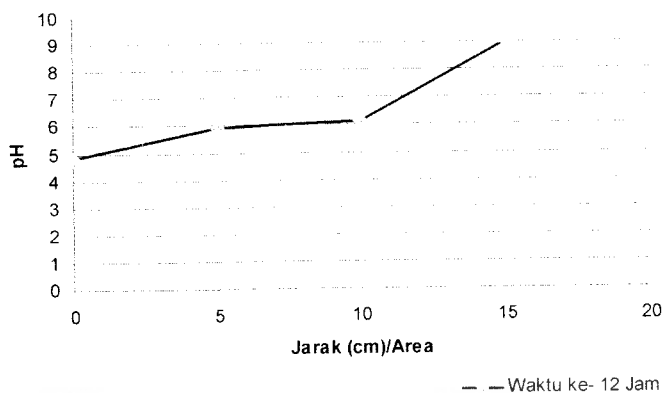
Gambar 4.1. Hubungan pH terhadap jarak pada waktu 3 jam



Gambar 4.2. Hubungan pH terhadap jarak pada waktu 6 jam



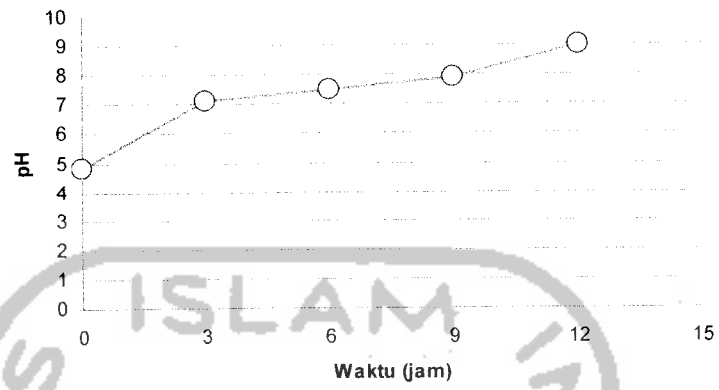
Gambar 4.3. Hubungan pH terhadap jarak pada waktu 9 jam



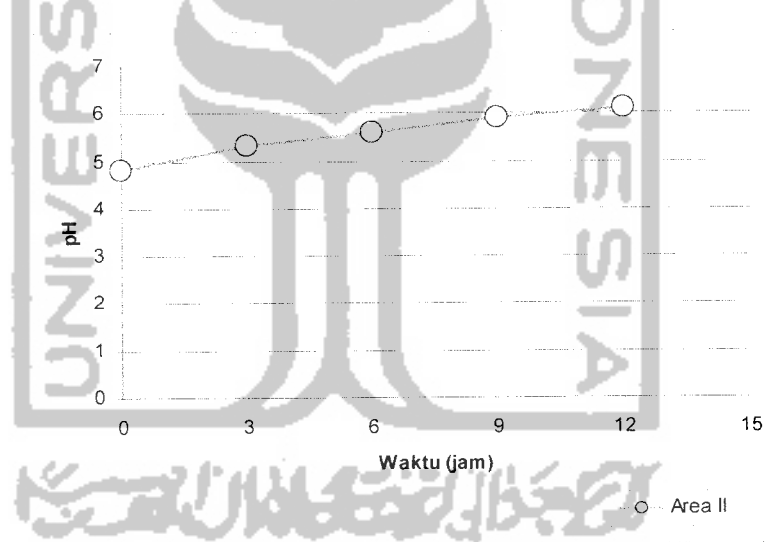
Gambar 4.4. Hubungan pH terhadap jarak pada waktu 12 jam

Gambar 4.1 sampai gambar 4.4 menunjukkan hubungan antara pH terhadap jarak untuk setiap interval waktu. Gambar ini menunjukkan perubahan pH yang mendasar pada setiap area. Semakin jauh jarak dari batang katoda, maka pH akan semakin naik atau memiliki kondisi basa, seperti contoh gambar 4.5. Gambar ini menunjukkan pH pada area III yang jaraknya 5 cm dari batang katoda sebesar 4,9, pada area II yang jaraknya 10 cm dari katoda sebesar 5,3 dan pada area I yang jaraknya 15 cm dari katoda sebesar menjadi 7,1.

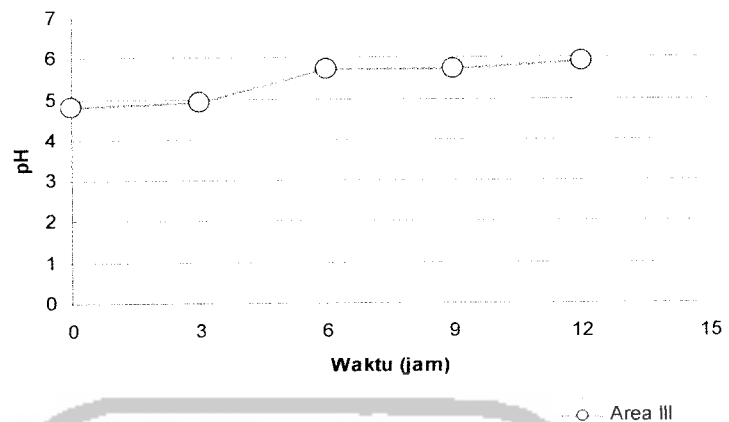
Selain itu juga dapat dibuat grafik hubungan antara pH terhadap waktu untuk setiap area, yang terlihat pada gambar 4.5 sampai gambar 4.7.



Gambar 4.5. Hubungan antara pH dengan waktu pada area I



Gambar 4.6. Hubungan antara pH dengan waktu pada area II

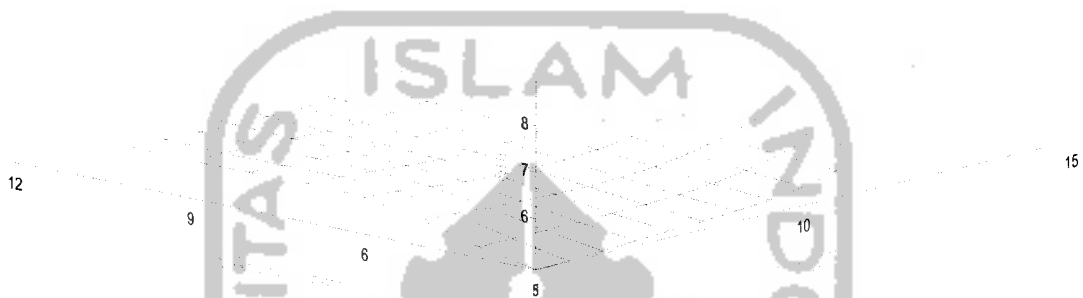


Gambar 4.7. Hubungan antara pH dengan waktu pada area III

Gambar 4.5 sampai gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan pH dengan waktu pada masing-masing area. Semakin lama waktu remediasi maka pH akan semakin naik. Pada area I (gambar 4.9) pH terus mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu. Area yang jaraknya 15 cm dari katoda ini memiliki kondisi awal asam dan setelah 12 jam terukur kondisinya berubah menjadi basa. Pada area II dan III kondisi pH sebelum dan sesudah remediasi elektrokinetik tetap bersifat asam tetapi mengalami kenaikan pH.

Kenaikan pH pada masing-masing area pada setiap waktunya terjadi karena konsentrasi kadmium yang ada pada setiap area berpindah atau bergerak menuju batang katoda. Katoda yang menyebarkan kondisi asam keseluruhan permukaan tanah hanya terjadi pada area III yang jaraknya 5 cm dari katoda dan area II yang jaraknya 10 cm dari katoda. Tanah yang memiliki kondisi asam akan mempercepat pergerakan ion menuju katoda.

Dari gambar-gambar grafik diatas dapat dibuat grafik hubungan antara pH, waktu dan jarak yang dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8. Hubungan antara pH, waktu dan jarak

Gambar 4.8 menunjukkan hubungan antara pH, waktu dan jarak. Gambar ini memberikan informasi bahwa semakin jauh jarak (area) dari katoda, maka nilai pH akan semakin besar dan begitu juga dengan waktu semakin lama waktu remediasi, maka nilai pH akan semakin naik.

Ditinjau dari hubungan antara pH, jarak dan waktu terlihat area I atau area anoda memiliki kondisi asam dan area III memiliki kondisi basa. Dari sumber penelitian yang telah dilakukan oleh Alshawabkeh dkk, 1994 didapat hasil pada area anoda bersifat basa dan pada area katoda bersifat asam karena adanya elektrolisis. Pada penelitian ini, proses elektrolisis tidak terjadi karena lemahnya atau tidak kuatnya kapasitas buffer menahan perubahan pH yang terjadi.

Salah satu penggunaan larutan buffer adalah pada penelitian yang dilakukan oleh Alshawabkeh dkk (1994) dengan menambahkan larutan asam asetat pada katoda.

Larutan buffer biasanya dapat dibuat dari :

- a. Basa lemah dengan garamnya.
- b. Asam lemah dengan garamnya.

Berikut ini merupakan contoh larutan buffer yang dapat digunakan dalam pengontrolan pH selama proses remediasi elektrokinetik.

Tabel 4.5. Beberapa contoh larutan buffer

Komponen	Interval pH yang Berguna
glisine + glisine hidroklorida	1,0 - 3,7
asam ftalat + kalium ftalat asam	2,2 - 3,8
asam asetat + natrium asetat	3,7 - 5,6
mononatrium faspfat + dinatrium fosfat	5,8 - 8,0
asam boraks + boraks	6,8 - 9,2
boraks + natrium hidroksida	9,2 - 11,00
dinatrium fosfat + trinatrium fosfat	11,00 - 12,00

Sumber : Rivai, Asas pemeriksaan kimia, 1995

Penambahan buffer merupakan suatu solusi dalam remediasi elektrokinetik, karena dengan penambahan buffer ini akan dapat menahan perubahan pH yang terjadi karena adanya penambahan H^+ dan OH^- ketika proses remediasi elektrokinetik berlangsung.

Sementara itu pada area II atau area yang letaknya 10 cm dari katoda memiliki kondisi asam dan memiliki nilai pH yang lebih tinggi dari area III. Nilai pH pada area

II ini bernilai antara 4,8 – 5,1, sehingga dimungkinkan area ini terpengaruh oleh area katoda.

4.2. Hasil Analisis Kadmium

Seperti yang disebutkan sebelumnya, penelitian ini merupakan simulasi dengan mengontakkan atau mencampurkan larutan CdSO_4 ke dalam tanah kaolinit yang berasal dari Godean. Berdasarkan hasil laboratorium konsentrasi kadmium awal menggunakan metode *Atomic Absorption spectrum* sebelum proses remediasi yang berada pada tanah sebesar 144,919 mg/kg. Pengambilan sampel tanah dilakukan selama 3 jam sekali pada titik sampling yang dapat dilihat pada gambar 3.5.

Pengambilan titik sampling tanah dilakukan pada 2 area yaitu pada area efektif yang berada pada area anoda dan katoda dan area inefektif yang berada pada area inefektif.

4.2.1. Hasil Analisis Konsentrasi Kadmium pada Area Efektif.

Area efektif merupakan area yang berada diantara anoda dan katoda. Untuk memudahkan analisis dari pergerakan logam berat kadmium area ini dibagi menjadi area I, II dan III.

Berikut ini disajikan data hasil uji laboratorium pada setiap area dengan menggunakan metode AAS (*Atomic Absorption spectrum*).

Tabel 4.6. Konsentrasi Cd rata-rata pada area I

Waktu (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi (mg/kg)
0	Awal	144.919
3	D1	144.891
6	A1	146.722
9	A1	145.762
12	A1	151.894
12	Katoda	42.972

Tabel 4.7. Konsentrasi Cd rata-rata pada area II

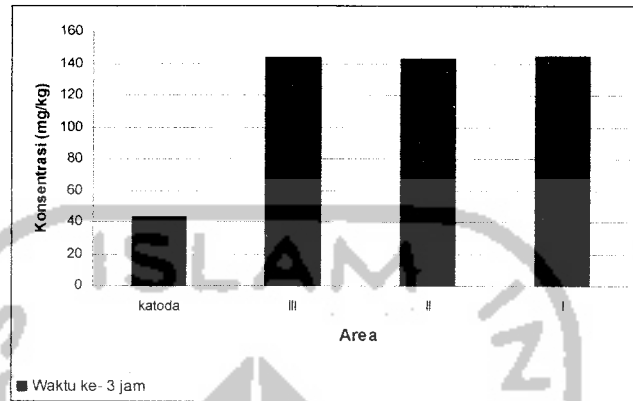
Waktu (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi (mg/kg)
0	Awal	144.919
3	B2	143.033
6	B2	142.304
9	B2	144.019
12	B2	144.862
12	Katoda	42.972

Tabel 4.8. Konsentrasi Cd rata-rata pada area III

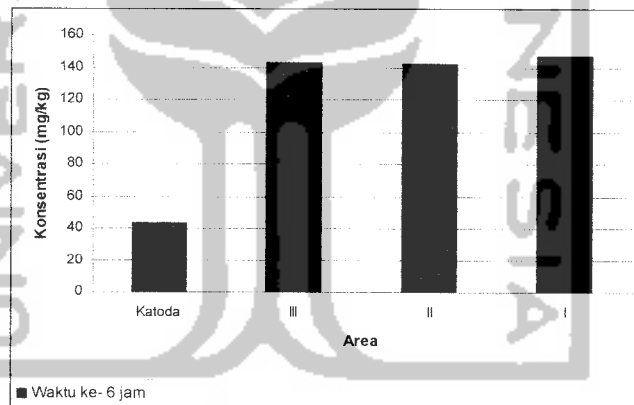
Waktu (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi (mg/kg)
0	Awal	144.919
3	E3	144.076
6	E3	143.061
9	E3	123.921
12	C3	144.948
12	Katoda	42.972

Dari data-data diatas terlihat adanya perbedaan konsentrasi pada masing-masing titik sampling (area). Konsentrasi awal logam berat kadmium sebelum remediasi elektrokinetik adalah 144,919 mg/kg. Pada 3 jam pertama konsentrasi kadmium pada area I sebesar 146,891mg/kg, pada area II sebesar 143,033 dan area III naik menjadi 144,076 mg/kg. Hal serupa juga terjadi pada pengukuran ke 6 jam, area I konsentrasinya sebesar 146,722mg/kg, area II turun menjadi 142,304 mg/kg dan pada area III naik menjadi 143,061 mg/kg. Pada pengambilan sampel ke 9 jam konsentrasi kadmium pada area I sebesar 145,762 mg/kg, sedangkan pada area II terjadi penurunan konsentrasi yang tidak terlalu mencolok, yaitu sebesar 144,019 mg/kg dan pada area III terjadi penurunan konsentrasi yang cukup besar yaitu menjadi 123,921 mg/kg. Pada waktu ke 12 jam konsentrasi kadmium yang terdapat pada area I sebesar 151,894 mg/kg, pada area II konsentrasi kadmium turun menjadi 144,862 mg/kg dan pada area ke III konsentrasi kadmium naik menjadi 144,948 mg/kg. Terukur pada batang katoda konsentrasi kadmium sebesar 42,972 mg/kg.

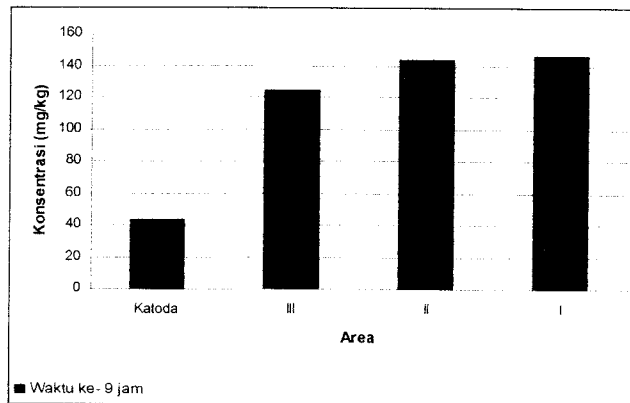
Dari tabel 4.6 sampai tabel 4.8 hasil pengujian konsentrasi kadmium di atas dapat dibuat grafik-grafik hubungan antara konsentrasi dengan jarak untuk setiap waktu yang terlihat pada gambar 4.9 sampai gambar 4.12 di bawah ini.



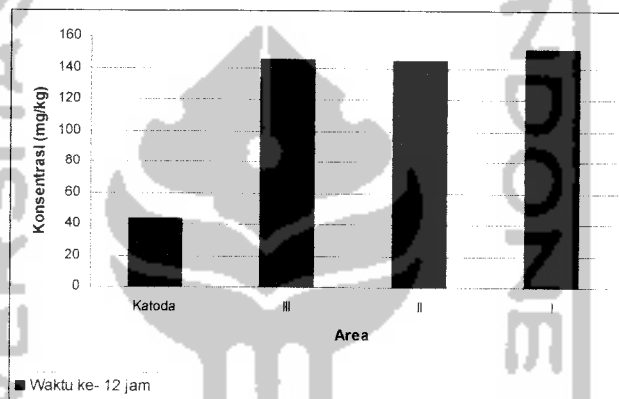
Gambar 4.9. Hubungan konsentrasi Cd terhadap jarak pada waktu ke- 3 jam



Gambar 4.10. Hubungan konsentrasi Cd terhadap jarak pada waktu ke- 6 jam



Gambar 4.11. Hubungan konsentrasi Cd terhadap jarak pada waktu ke- 9 jam



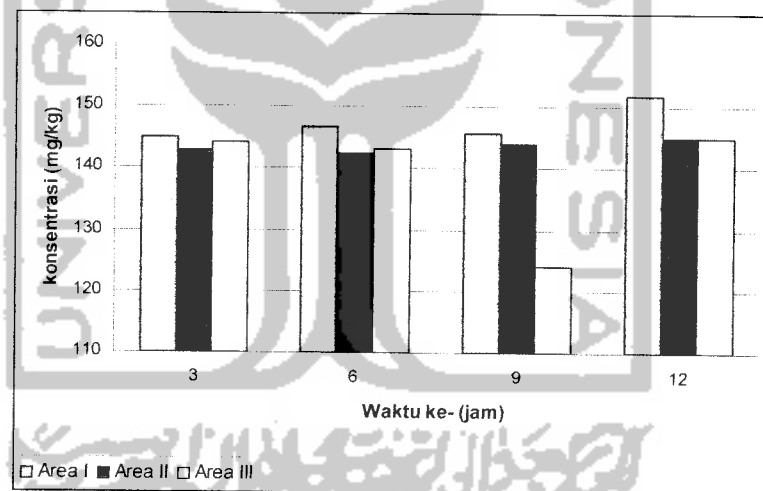
Gambar 4.12. Hubungan konsentrasi Cd terhadap jarak pada waktu ke- 12 jam

Gambar 4.9 sampai gambar 4.12 menunjukkan hubungan konsentrasi kadmium terhadap jarak untuk setiap interval waktu. Gambar-gambar tersebut memberikan informasi bahwa terjadi perubahan konsentrasi kadmium pada setiap interval waktu. Konsentrasi kadmium pada batang katoda setelah proses remediasi elektrokinetik adalah 42,972 mg/kg. Perubahan konsentrasi tidak terlalu signifikan,

dimana konsentrasi terendah pada waktu ke 9 jam yaitu pada area II sebesar 123,921 mg/kg.

Pada penelitian ini jarak antara katoda dan anoda adalah 15 cm sedangkan jarak maksimal antara katoda dan anoda pada metode konfigurasi 2-D *hexagonal* adalah 30 cm. Penggunaan jarak 15 cm ini ternyata belum optimal dalam penurunan konsentrasi kadmium karena masih terlalu jauhnya jarak peletakan antara anoda dan katoda. Hal ini dibuktikan pada area III yang jaraknya 5 cm dari katoda memiliki penurunan konsentrasi yang lebih besar dibandingkan dengan area yang lainnya.

Selain itu dapat dibuat grafik hubungan antara konsentrasi kadmium dengan waktu pada masing-masing area yang terlihat pada gambar 4.13 di bawah ini.

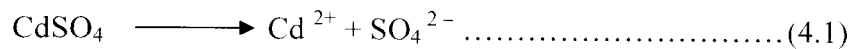


Gambar 4.13. Hubungan antara konsentrasi kadmium dengan waktu

Gambar 4.13 menunjukkan hubungan antara konsentrasi kadmium dengan waktu pada masing-masing area. Fenomena di atas diindikasikan telah terjadi proses elektromigrasi dibawah pengaruh medan listrik.

Elektromigrasi adalah perpindahan ion-ion ke elektroda yang berlawanan karena pengaruh medan listrik. Ion-ion positif (kation) akan menuju atau menempel pada batang katoda ion-ion negatif (anion) akan menempel pada batang anoda, (Pack,1997).

Tanah akan mengalami 2 proses tahapan reaksi, yaitu yang pertama adalah



Dan reaksi yang kedua adalah



Persamaan 4.1 merupakan reaksi pemecahan larutan CdSO_4 yang terjadi karena adanya aliran listrik yang mengalir melalui elektroda-elektroda. Perubahan energi listrik menjadi energi kimia menyebabkan migrasi ion-ion menuju elektroda yang berlawanan. Proses migrasi ini akan menyebabkan reaksi reduksi dan oksidasi. Reduksi adalah reaksi yang terjadi pada katoda dimana akan terjadi pelepasan elektron. Pelepasan 2 elektron ini akan menyebabkan kadmium berubah menjadi netral (Cd^0) dan akan mengendap pada sisi-sisi permukaan batang katoda. Sementara itu oksidasi adalah reaksi yang terjadi pada anoda dimana akan terjadi penerimaan elektron. Reaksi oksidasi tidak dapat terjadi pada SO_4^{2-} tetapi yang akan mengalami oksidasi adalah pelarutnya (air) dan pada akhirnya terbentuk gas oksigen (persamaan 2.7).

Secara prinsip remediasi elektrokinetik dapat digunakan untuk memulihkan tanah yang tercemar logam berat Cd, tetapi pada penelitian ini penurunan logam Cd tidak terjadi secara linier dimungkinkan karena elektroda karbon yang berdiameter

0,8 cm dan memiliki panjang 5 cm ini ternyata tidak mampu menarik ion-ion kadmium untuk menempel pada batang katoda dan homogenitas sampel yang tidak diketahui .

Tidak menutup kemungkinan dalam proses remediasi elektrokinetik penurunan kadar Cd dalam tanah terdapat parameter pengganggu lain yang memungkinkan akan mempengaruhi penurunan kadar Cd tersebut (tabel 4.7), sehingga penurunan kadar Cd tidak begitu optimal. Logam berat pengganggu ini akan berpengaruh apabila mempunyai potensial reduksi yang lebih besar dari pada Cd. Di dalam deret potensial logam atau yang lebih dikenal dengan deret volta dapat diurutkan dari yang terkecil ke yang besar, yaitu K – Ba – Ca – Na – Mg – Al – Mn – Zn – Cr – Fe – Cd – Co – Ni – Sn – Pb – (H) – Sb – Bi – Cu – Hg – Ag – Pt – Au dengan nilai potensial elektroda berturut-turut (-2,92) – (-2,90) – (-2,87) – (-2,71) – (-2,37) – (-1,66) – (-1,18) – (-0,76) – (-0,74) – (-0,44) – (-0,40) – (-0,28) – (-0,25) – (-0,14) – (-0,13) – (0,00) – (+0,34) – (+0,79) – (+0,80) – (0,99) – (+1,50). Makin ke kanan letak suatu logam dalam deret volta, harga potensial reduksinya semakin besar. Hal ini berarti logam-logam disebelah kanan mudah mengalami reduksi serta sukar mengalami oksidasi, sehingga logam-logam sebelah kanan akan bereaksi terlebih dahulu pada katoda dari pada Cd.

Selain itu juga fenomena perubahan warna pada tanah setelah proses remediasi elektrokinetik tidak terjadi karena sedikitnya perpindahan atau migrasi logam kadmium yang menuju katoda. Warna tanah sebelum dan sesudah remediasi coklat muda dikarenakan warna Cd^{2+} berwarna putih seperti putih perak.

Menurut Pamukcu (1994), 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.

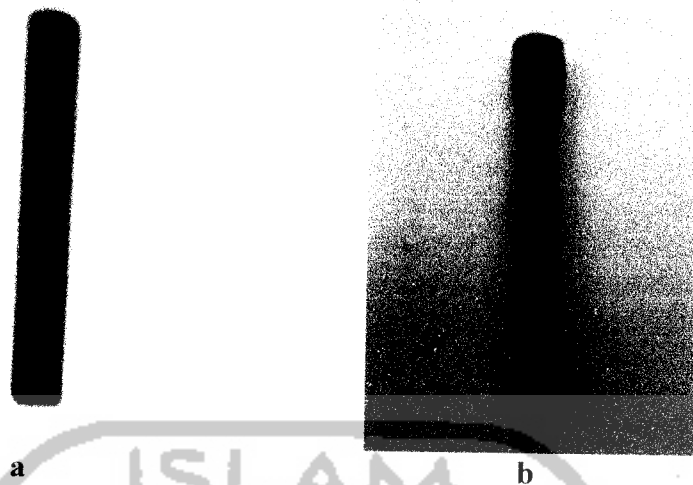
4.2.2. Hasil Analisis pada Batang Katoda.

Elektroda merupakan batang-batang yang apabila dialirkan arus listrik akan bermuatan positif dan negatif. Batang yang bermuatan positif dikenal dengan nama anoda sedangkan batang yang bermuatan negatif disebut dengan katoda. Proses elektromigrasi menyebabkan logam-logam Cd akan berkumpul pada batang katoda. Di bawah ini disajikan data hasil pengukuran konsentrasi kadmium awal sebelum proses remediasi elektrokinetik dan pada batang katoda setelah terjadi proses remediasi elektrokinetik yang terlihat pada tabel 4.9 di bawah ini.

Tabel 4.9. Konsentrasi kadmium awal dan yang menempel di katoda

Titik Sampel	Konsentrasi Rata-rata Area (mg/kg)
Awal	144,919
Katoda	42,972

Salah satu proses yang terjadi pada remediasi elektrokinetik adalah perpindahan ion-ion Cd^{2+} menuju batang katoda dan mengalami reduksi menjadi Cd^0 . Konsentrasi Cd^0 pada batang katoda sangatlah kecil yaitu sebesar 42,972 mg/kg. Berikut ini disajikan gambar batang katoda sebelum proses remediasi dan sesudah proses remediasi.



Gambar a. Batang katoda sebelum proses remediasi elektrokinetik, b. Batang katoda sesudah proses remediasi elektrokinetik

Dari gambar 4.14 dan gambar 4.15 di atas, terlihat perbedaan fisik batang katoda sebelum dan sesudah proses remediasi. Batang katoda setelah proses remediasi elektrokinetik mengalami pengikisan pada dinding-dinding luar katoda dan diameter katoda menjadi kecil, sehingga menyebabkan katoda ini tidak dapat bekerja maksimal untuk mereduksi dan mengendapkan logam kadmium.

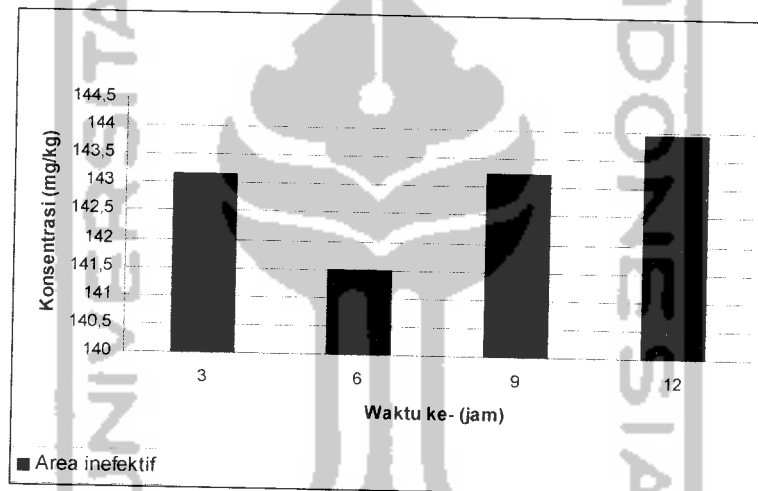
4.2.3. Hasil Analisis konsentrasi kadmium pada area inefektif.

Area inefektif merupakan area pembanding dengan area efektif ketika proses remediasi elektrokinetik berlangsung. Area yang berjarak 15 cm dari anoda ini juga dilakukan pengambilan titik sampling selama interval waktu 3 jam dan dapat dilihat pada gambar 3.5. Adapun hasil uji konsentrasi Cd pada area inefektif dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10. Konsentrasi Kadmium pada Area inefektif

Waktu (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi (mg/kg)
0	Z1	144,919
3	Z1	143,147
6	Z1	141,489
9	Z1	143,233
12	Z1	143,961

Dari tabel 4.10 dapat dibuat grafik hubungan antara konsentrasi Cd dengan waktu yang terlihat pada gambar 4.16.

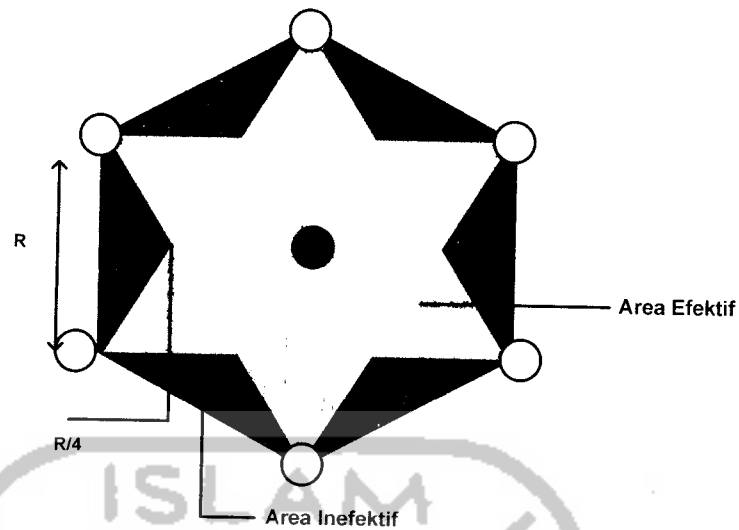
**Gambar 4.14. Hubungan antara konsentrasi kadmium dengan waktu pada area inefektif**

Dari gambar 4.14 diatas, terlihat adanya perbedaan konsentrasi Cd pada masing-masing interval waktu. Pada 3 jam pertama, konsentrasi Cd sebesar 143,147 mg/kg dan konsentrasi Cd 6 jam mengalami penurunan menjadi 141,489 mg/kg. Kenaikan konsentrasi terjadi pada 9 jam dan 12 yang secara berturut-turut konsentrasi Cd menjadi 143,233 mg/kg dan 144, 961

Perbedaan konsentrasi pada area inefektif disebabkan oleh masih terpengaruhnya daerah inefektif oleh medan listrik. Ion-ion Cd^{2+} yang berada pada area inefektif akan menuju katoda melalui area efektif atau area I, II dan III.

Secara umum tujuan penerapan konfigurasi elektroda 2D adalah untuk mencapai aliran radial (*axi-symmetrical*). Katoda ditempatkan di tengah untuk memberikan akumulasi kontaminan Cd pada zona yang lebih kecil di sekitar katoda sedangkan anoda ditempatkan pada batas pinggir untuk memaksimalkan penyebaran lingkungan asam yang dibangkitkan oleh anoda dan meminimalkan perluasan lingkungan basa yang dibangkitkan oleh katoda. Titik-titik *inactiv* (mati) medan listrik dalam konfigurasi 2-D terbentuk, namun lebih kecil dibandingkan yang terbangun pada konfigurasi 1-D yang berisi garis paralel anoda dan katoda. Dalam konfigurasi 1-D, rapat arus lokasinya bebas, dalam konfigurasi 2-D, rapat arus bertambah secara linier dengan jarak menuju katoda. Kuatnya medan listrik juga bertambah secara linier dengan jarak menuju katoda (Alshawbkeh, 1999).

Menurut Alshawabkeh (1999), distribusi medan listrik menunjukkan area inefektif beberapa sel berbentuk *curvilinear triangle* (segitiga sama kaki) dengan badan kaki merupakan jarak elektroda yang mempunyai polaritas sama. Tinggi area segitiga ini diperkirakan tergantung pada waktu proses, spasi elektroda dan kesejajaran, seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.15. Bentuk area efektif dan inefektif karena distribusi medan listrik (Alshwabkeh, 1999).

4.3. Hasil Analisis Efisiensi Penurunan Kadmium pada Area efektif dan Area Inefektif

Remediasi elektrokinetik adalah salah satu upaya penurunan konsentrasi logam-logam berat yang terdapat di dalam tanah dengan menggunakan tegangan rendah dan arus searah yang dialirkan pada batang-batang elektroda. Remediasi elektrokinetik merupakan salah satu alternatif pemulihan tanah yang terkontaminasi logam berat. Metode ini sebenarnya telah ada sejak tahun 1809 tetapi pada dekade tersebut tidak difahami fenomena yang terjadi di dalam elektrokinetik. Metode ini terus berkembang hingga sekarang ini yang ditandai dengan semakin menjamurnya penelitian-penelitian remediasi elektrokinetik pada tanah maupun pada air tanah yang terkontaminasi logam berat.

Dari hasil uji laboratorium untuk setiap titik sampel selama 12 jam dapat diketahui seberapa besar efisiensi penurunan konsentrasi Cd seperti pada hitungan dibawah ini.

- a. Efisiensi penurunan konsentrasi Cd pada area I.

$$\begin{aligned} \%E &= \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\% \\ &= \frac{144,919 \text{ mg/kg} - 147,317 \text{ mg/kg}}{144,919 \text{ mg/kg}} \times 100\% \\ &= -1,655\% \end{aligned}$$

- b. Efisiensi penurunan konsentrasi Cd pada area II.

$$\begin{aligned} \%E &= \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\% \\ &= \frac{144,919 \text{ mg/kg} - 14,555 \text{ mg/kg}}{144,919 \text{ mg/kg}} \times 100\% \\ &= 0,941\% \end{aligned}$$

- c. Efisiensi penurunan konsentrasi Cd pada area III.

$$\begin{aligned} \%E &= \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\% \\ &= \frac{144,919 \text{ mg/kg} - 141,753 \text{ mg/kg}}{139,002 \text{ mg/kg}} \times 100\% \\ &= 4,083\% \end{aligned}$$

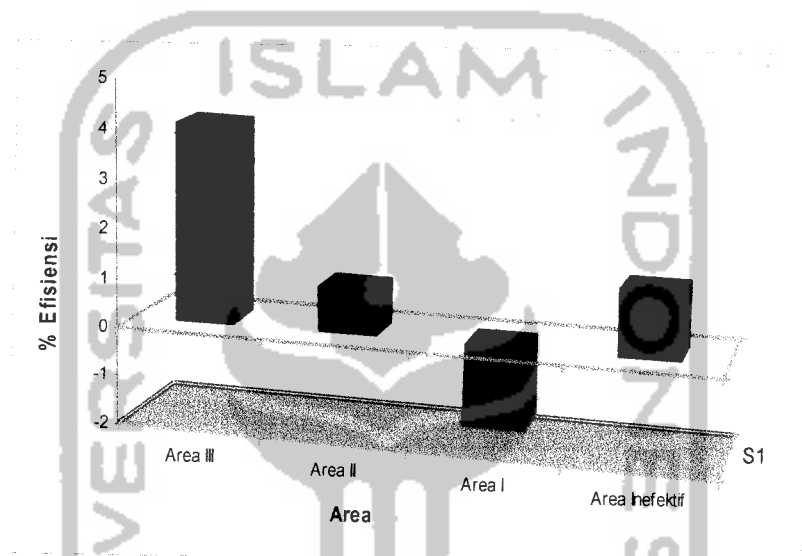
- d. Efisiensi penurunan konsentrasi Cd pada area inefektif.

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

$$= \frac{144,919 \text{ mg/kg} - 142,958 \text{ mg/kg}}{144,338 \text{ mg/kg}} \times 100\%$$

$$= 1,353\%$$

Efisiensi menunjukkan banyaknya migrasi ion-ion Cd menuju batang katoda. Dari besarnya nilai efisiensi diatas dapat dibuat grafik antara % penurunan konsentrasi Cd terhadap area yang ditunjukkan pada gambar 4.18.



Gambar 4.16. Efisiensi penurunan konsentrasi kadmium pada masing-masing area

Dari gambar 4.16 terlihat bahwa efisiensi penurunan konsentrasi kadmium setelah proses remediasi elektrokinetik terbesar terjadi pada area III yaitu sebesar 4,083 % dan efisiensi terendah terdapat pada area I sebesar -1,655%. Untuk area II efisiensi penurunan konsentrasi Cd sebesar 0,941 % dan penurunan konsentrasi pada area inefektif sebesar 1,353 %. Proses migrasi ion-ion Cd²⁺ terjadi pada semua arah permukaan tanah, yaitu pada area inefektif dan area efektif. Penurunan konsentrasi

kadmium tidak terjadi terjadi pada area I dimungkinkan terjadi, karena migrasi ion-ion kadmium dari area inefektif berkumpul pada area I selama terjadinya proses elektrokinetik. Sementara itu, logam-logam Cd akan berlomba-lomba menuju katoda. Besarnya efisiensi pada area III disebabkan karena area ini memiliki jarak yang terdekat dari batang katoda sehingga logam-logam Cd²⁺ akan lebih mudah tertarik menuju batang katoda.

Konsentrasi kadmium setelah proses remediasi elektrokinetik pada area efektif maupun pada area inefektif masih melebihi nilai ambang batas yang ditetapkan oleh National Environment Protection Council 1999 yaitu untuk kedalaman tanah 0,2 m konsentrasi kadmium adalah sebesar 0,2 mg/kg dan dapat dilihat pada lampiran VI.

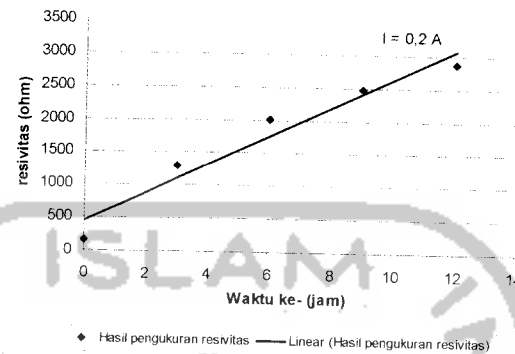
4. 4. Hasil Analisis Resistensi, Arus dan Voltase

Pengukuran resistensi dan arus dilakukan beriringan dengan pengukuran pH dan pengambilan titik sampel pada interval 3 jam selama 12 jam. Untuk pengukuran resistensi, power supply dimatikan. Data hasil pengukuran resistensi dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.11. Hasil pengukuran resistensi pada masing-masing anoda

Waktu ke- (jam)	Resistensi (Ω)	Arus (A)
0	166,667	0
3	1299,253	0,2
6	2005,342	0,2
9	2473,363	0,2
12	2863,108	0,2

Dari tabel 4.11 dapat dibuat grafik hubungan antara resistensi dengan waktu yang ditunjukkan pada gambar 4.19



Gambar 4.17 Hubungan antara resistensi dengan waktu

Gambar 4.19 menunjukkan hubungan antara resistensi dengan waktu selama proses remediasi berlangsung. Resistensi awal sebelum remediasi adalah 166,667 Ω dan resistensi ini terus mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu dengan arus yang konstan, sebesar 0,2 A. Arus mempunyai keterkaitan dengan tegangan yang dialirkan dari *power supply*. Voltase yang dipakai pada penelitian ini ternyata tidak mampu menghasilkan arus yang cukup untuk menarik logam kadmium menuju batang katoda. Voltase yang dibutuhkan untuk setiap logam tidak dapat diukur dengan menggunakan rumus secara empiris, karena setiap logam memiliki resistensi yang berbeda satu sama lainnya. Sesuai dengan deret volta semakin ke kiri maka tegangan yang dibutuhkan untuk mereduksi logam berat akan semakin besar. Untuk pemaksimalan migrasi logam-logam berat haruslah dilakukan beberapa kali perulangan penggunaan voltase yang berbeda-beda sehingga pada akhirnya dipilih

voltase yang memiliki penurunan konsentrasi yang maksimal. Semakin besar voltase dan arus yang digunakan untuk meremediasi logam akan semakin besar pula efisiensi penurunan konsentrasinya.

Pada 3 jam pengukuran pertama nilai resistensi sebesar 1299,253 Ω , 6 jam sampai 12 jam berturut-turut adalah 2005,342 Ω , 2473,363 Ω dan 2863,108 Ω . Kenaikan resistensi ini disebabkan oleh penurunan konsentrasi ion-ion positif logam-logam berat yang menuju katoda. Sesuai dengan pernyataan Bueche(1989), bahwa resistensi berbanding terbalik dengan luas penampang. Pengcilan luas penampang disebabkan karena pengendapan logam-logam berat yang telah direduksi menjadi logam-logamnya.

4.5. Hasil Analisis Hubungan antara Konsentrasi, pH dan Waktu di Area Efektif.

Proses remediasi elektrokinetik menyebabkan terjadi beberapa perubahan mendasar dari kondisi awal sampai terjadinya perubahan pH, konsentrasi logam kadmium dan lain-lain. Berdasarkan dari beberapa perubahan ini menyebabkan perlunya dikaji hubungan antara pH dan konsentrasi kadmium. Di bawah ini disajikan data hasil pengukuran pH pada masing-masing area dan konsentrasi kadmium pada masing-masing area.

Tabel. 4.12. Hubungan konsentrasi Cd terhadap pH pada area I

Waktu Ke-	Konsentrasi Rata-rata Area (mg/kg)	ph rata-rata
0 jam	144,919	4,8
3 jam	144,891	7,1
6 jam	146,722	7,5
9 jam	145,762	7,9
12 jam	151,894	9

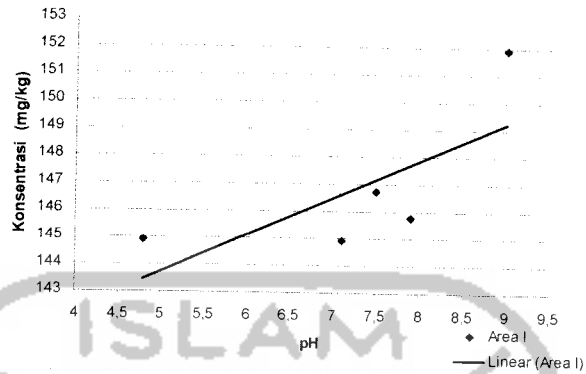
Tabel. 4.13. Hubungan konsentrasi Cd terhadap pH pada area II

Waktu Ke-	Konsentrasi Rata-rata Area (mg/kg)	ph rata-rata
0 jam	144,919	4,8
3 jam	143,033	5,3
6 jam	142,304	5,6
9 jam	144,019	5,9
12 jam	144,862	6,1

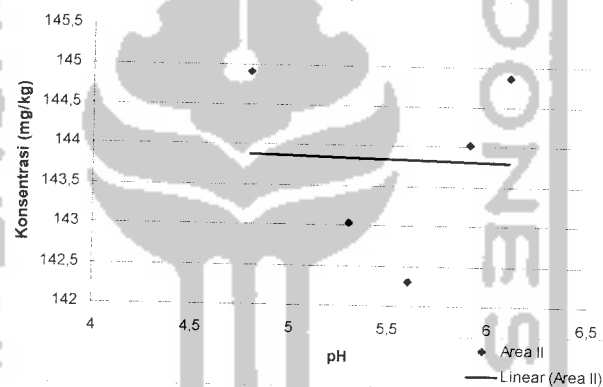
Tabel. 4.14. Hubungan konsentrasi Cd terhadap pH pada area III

Waktu Ke-	Konsentrasi Rata-rata Area (mg/kg)	ph rata-rata
0 jam	144,919	4,8
3 jam	144,076	4,9
6 jam	143,061	5,7
9 jam	123,921	5,7
12 jam	144,948	5,9

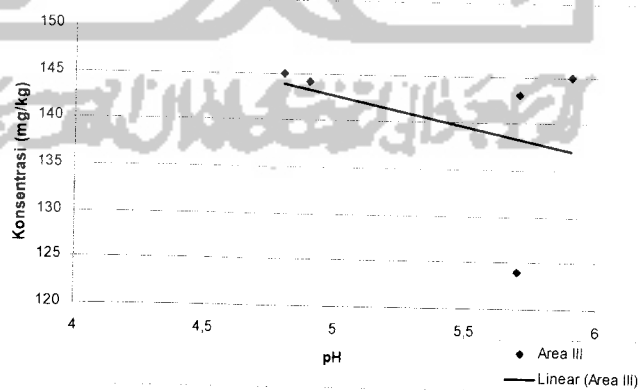
Dari tabel 4.12 sampai tabel 4.14 dapat dibuat grafik hubungan antara konsentrasi Cd dengan pH yang terlihat pada gambar 4.20 sampai gambar 4.22



Gambar 4.18. Hubungan konsentarsi dengan pH pada area I



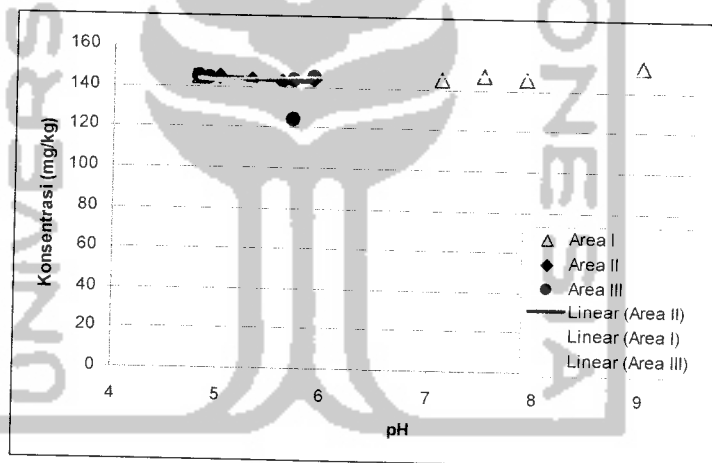
Gambar 4.19. Hubungan konsentarsi dengan pH pada area II



Gambar 4.20. Hubungan konsentarsi dengan pH pada area III

Gambar 4.18 sampai gambar 4.20 menunjukkan hubungan antara konsentrasi dengan pH pada masing-masing area. Fenomena yang terjadi adalah perubahan pH yang diikuti dengan perubahan konsentrasi kadmium. Pada area I kondisi tanah bersifat basa dengan pH tertinggi 9 yaitu pada waktu ke 12 jam. Area II yang berjarak 10 cm dari katoda mengalami penurunan konsentrasi seiring dengan kenaikan pH, tetapi tanah pada area ini bersifat asam dengan pH tertinggi sebesar 6,1. Sedangkan pada area III mengalami hal yang sama dengan area II yaitu penurunan konsentrasi diiringi dengan naiknya pH dan pada area ini tanah bersifat asam.

Di bawah ini disajikan grafik gabungan hubungan antara konsentrasi terhadap pH yang dapat dilihat pada gambar 4.21.



Gambar 4.21. Hubungan antara konsentrasi terhadap pH pada area efektif

Dari gambar 4.21 perubahan pH yang terjadi karena adanya proses *electromigration* dan akibat pengaruh dari medan listrik, seharusnya pada perubahan pH ini tidak hanya proses *electromigration* saja tetapi juga *electrolysis*. Sedangkan untuk penurunan konsentrasi Cr diakibatkan karena adanya *electrophoresis* dan

migrasi ion. Fenomena yang terjadi pada gambar-gambar di atas ditunjukkan pada garis linear, sehingga terjadi kenaikan dan penurunan yang tidak stabil dengan data yang ada, ini dimungkinkan karena terdapat kesalahan dan kekurangan dalam penelitian ini. Kesalahan yang terjadi bisa jadi karena kondisi yang sudah jenuh dan tidak proporsionalnya elektroda yang digunakan.

