

TA/TL/2005/0013

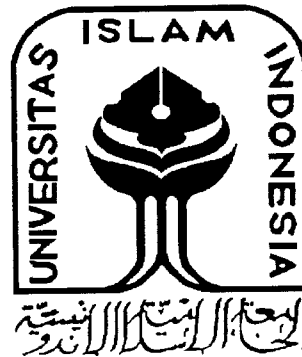
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA	
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN	
TGL. TERIMA :	_____
NO. JUDEL :	_____
NO. BIV. :	_____
NO. STAMP :	_____

TUGAS AKHIR

**REMEDIASI ELEKTROKINETIK dengan MODEL
KONFIGURASI ELEKTRODA 2-D *HEXAGONAL* pada
TANAH TERKONTAMINASI LOGAM BERAT Cr**

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk memenuhi sebagian
persyaratan memperoleh derajat Sarjana Teknik Lingkungan

R
6208.4
Tae
r
1



xiv. 790 hah ang...

oleh :

Nama : SITI FATIMAH
No. Mhs. : 99513008

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

• Nomor ...
• Elektroda 2D Hex...

JOGJAKARTA

2004

TUGAS AKHIR


REMEDIASI ELEKTROKINETIK dengan MODEL KONFIGURASI ELEKTRODA 2-D *HEXAGONAL* pada TANAH TERKONTAMINASI LOGAM BERAT Cr

Nama : Siti Fatimah
No. Mhs. : 99513008

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

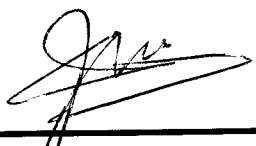
Luqman Hakim, ST., MSi.

Dosen Pembimbing I


Tanggal : 6/10/05

Dr. Sismanto, MSi.

Dosen Pembimbing II


Tanggal :

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan kegiatan tugas akhir ini.

Laporan tugas akhir ini sesuai dengan kurikulum yang ada di lingkungan Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia, Jogjakarta yang merupakan salah satu syarat dalam menempuh jenjang kesarjanaaan Strata I.

Maksud dan tujuan tugas akhir ini adalah untuk mempelajari fenomena elektro remediasi pada tanah terkontaminasi logam berat Cr dengan menggunakan teknik elektrokinetik konfigurasi 2D *hexagonal* serta mengetahui efisiensi penurunan konsentrasi logam berat Cr pada tanah tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan ilmu pengetahuan tentang remediasi tanah khususnya mengenai remediasi dengan teknik elektrokinetik dan sebagai informasi bagi masyarakat dan industri dikemudian hari.

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan di Laboratorium Rancang Bangun Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia. Sedangkan untuk analisis hasil penelitian tersebut dilakukan di Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jogjakarta.

Selama melaksanakan penelitian tugas akhir dan menyusun laporan, penulis telah banyak mendapat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini disampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Ir.H. Widodo, MSCE, Phd selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Jogjakarta,
2. Bapak Ir. H. Kasam, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, UII, Jogjakarta,
3. Bapak Luqman Hakim, ST, Msi selaku Dosen Pembimbing I,
4. Bapak Dr. Sismanto, Msi selaku Dosen Pembimbing II,
5. Bapak Eko Siswoyo, ST selaku Dosen Penguji,
6. Bapak Riyanto, MSi selaku Ketua Jurusan Kimia , FMIPA, UII, Jogja,
7. Bapak Andik Yulianto, ST selaku Dosen Pengampu mata kuliah Pencemaran Tanah dan Air Tanah, Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP, UII, Jogjakarta,
8. Bapak Hudori, ST selaku Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP, UII, Jogjakarta,
9. Bapak Syamsudin dan Bapak Tasyono selaku Laboran di Laboratorium Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP, UII, Jogjakarta.

Pada akhirnya segala daya upaya serta kemampuan yang telah penulis curahkan sepenuhnya demi terselesaikannya laporan tugas akhir ini tidak terlepas dari segala kekurangan yang ada. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Akhir kata, semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Amiin.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb

Jogjakarta, Desember 2004

Penulis

*Sebagai wujud rasa cinta, bakti dan kasih sayang,
kupersembahkan sebuah karya yang sangat sederhana dan
tidak seberapa jika dibandingkan dengan
cinta kasih, kebaikan serta jasa mereka :*

*Bapak dan Ibu tercinta
Bapak H. A. Hamid Soedjadi, SH., MSc., MM.
Ibu Hj. Elmiyati Djunjungan, SPd.
Adik-adikku tersayang
Dek Fitri dan Dek Yayang (in memoriam).
Keluarga besar Eyang Y.A. Soedjadi,
Keluarga besar Sidi T.R. Djunjungan.*

*Kekasih, teman, dan sahabat
Ari Retissu, Adi Saputra, Zicko, Mia Karina, Novi,
Wira, Tera, Neneng, Uly, The BU6 girls,
The Big Blue (R7831CB), The P4, D'Enviro Community.*

*Allah pemberi cahaya kepada langit dan bumi,
perumpamaan cahaya Allah adalah seperti lubang
yang tak tembus cahaya, di dalamnya terdapat pelita besar.*

*Pelita itu ada di dalam kaca dan kaca itu
seakan-akan bintang yang bercahaya seperti mutiara,
yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang banyak
berkahnya,
yaitu Pohon Zaitun yang tumbuh tidak di sebelah timur
dan tidak di sebelah barat, yang minyaknya saja hampir-
hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api.*

*Cahaya di atas cahaya,
Allah membimbing kepada cahaya-Nya siapa yang Ia
kehendaki dan Allah membuat perumpamaan bagi manusia
dan
Allah Maha Mengetahui segala sesuatu.*

(QS. An Nuur :35)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
ABSTRACT	xiii
INTISARI	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Manfaat Penelitian.....	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Lapisan Tanah.....	6
2.2. Sifat Kimia dan Fisis Tanah.....	8
2.3. Kimia Tanah.....	14
2.4. Pencemaran Tanah.....	14
2.5. Pencemaran Logam Berat dalam Tanah.....	16

2.6. Khromium.....	16
2.7. Remediasi Tanah.....	18
2.8. Remediasi Elektrokinetik.....	19
2.9. Landasan Teori.....	27
2.10. Hipotesis.....	29
BAB III. METODELOGI PENELITIAN.....	30
3.1. Lokasi Penelitian.....	30
3.2. Waktu Penelitian.....	30
3.3. Metode Pengumpulan Data.....	30
3.4. Metode Eksperimen.....	31
3.5. Desain.....	35
3.5.1. Kebutuhan Elektroda.....	35
3.5.2. Desain Reaktor.....	37
3.5.3. Desain Titik Sampling.....	38
3.5.4. Desain Wadah dan Berat Tanah.....	39
BAB IV. HASIL PENELITIAN dan PEMBAHASAN.....	40
4.1. Hasil Analisis pH pada Area Efektif.....	40
4.2. Hasil Analisis Konsentrasi Cr pada Area Efektif.....	49
4.3. Hasil Analisis pada Arus dan Resistensi.....	60
4.4. Hubungan Waktu, Konsentrasi dan pH pada Area Efektif.....	62
4.5. Hasil Analisis Konsentrasi Cr pada Area Inefektif.....	65
4.6. Hasil Analisis Konsentrasi Cr pada Tanah yang Tidak Diremediasi.....	69

4.7. Hasil Analisis Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr.....	71
4.8. Pengaruh Remediasi Elektrokinetik terhadap Aspek Lingkungan.....	74
BAB V. KESIMPULAN dan SARAN.....	76
5.1. Kesimpulan.....	76
5.2. Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Prinsip Dasar Remediasi Elektrokinetik.....	19
Gambar 2.2.	Konfigurasi elektroda 1-D dan 2-D <i>hexagonal</i>	27
Gambar 3.1.	Alur pikir penelitian.....	34
Gambar 3.2.	Konfigurasi elektroda <i>hexagonal</i>	36
Gambar 3.3.	Desain Reaktor.....	37
Gambar 3.4.	Desain Titik Sampling.....	38
Gambar 3.5.	Desain Wadah dan Berat Tanah.....	39
Gambar 4.1.	Grafik Hubungan antara pH terhadap Jarak.....	43
Gambar 4.2.	Perbedaan asam dan basa pada potongan area titik sampling....	45
Gambar 4.3.	Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area I.....	46
Gambar 4.4.	Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area II.....	46
Gambar 4.5.	Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area III.....	47
Gambar 4.6.	Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area Efektif.....	47
Gambar 4.7.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-3 Jam.....	52
Gambar 4.8.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-6 Jam.....	53
Gambar 4.9.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-9 Jam.....	53
Gambar 4.10.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-12 Jam.....	53

Gambar 4.11.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Area Efektif.....	54
Gambar 4.12.	Arah proses elektromigrasi atau migrasi ion pada anoda dan katoda.....	57
Gambar 4.13.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area I.....	58
Gambar 4.14.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area II.....	58
Gambar 4.15.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area III.....	58
Gambar 4.16.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area Efektif.....	59
Gambar 4.17.	Grafik Hubungan Resistensi, Waktu dan Arus.....	61
Gambar 4.18.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area I.....	63
Gambar 4.19.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area II.....	63
Gambar 4.20.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area III.....	63
Gambar 4.21.	Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area Efektif.....	65
Gambar 4.22.	Grafik Konsentrasi Cr terhadap Waktu pada Area Inefektif.....	67
Gambar 4.23.	Bentuk Area Efektif dan Inefektif karena Distribusi Medan Listrik.....	68
Gambar 4.24.	Konsentrasi Cr dan pH Rata-rata pada setiap Titik Sampling...	69
Gambar 4.25.	Grafik Konsentrasi Cr Rata-rata dalam Tanah di Seluruh Titik Sampling.....	71
Gambar 4.26.	Grafik Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Setiap Area.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Perbandingan Kebutuhan Elektroda Tiap-tiap Konfigurasi.....	37
Tabel 4.1.	Hasil Pengukuran pH dalam Area Anoda (I).....	41
Tabel 4.2.	Hasil Pengukuran pH dalam Area Katoda (III).....	41
Tabel 4.3.	Hasil Pengukuran pH dalam Area II.....	42
Tabel 4.4.	Hasil Analisis Konsentrasi Cr dalam Tanah pada Area Efektif....	50
Tabel 4.5.	Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area I.....	51
Tabel 4.6.	Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area II.....	51
Tabel 4.7.	Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area III.....	52
Tabel 4.8.	Hasil Pengukuran pada Arus dan Resistensi.....	60
Tabel 4.9.	Hubungan Waktu, Konsentrasi dan pH pada Area I.....	62
Tabel 4.10.	Hubungan Waktu, Konsentrasi dan pH pada Area II.....	62
Tabel 4.11.	Hubungan Waktu, Konsentrasi dan pH pada Area III.....	62
Tabel 4.12.	Hasil Analisis Konsentrasi Cr pada Area Inefektif.....	66
Tabel 4.13.	Hasil Analisis Konsentrasi Cr dalam Tanah pada Seluruh Titik Sampling Selama 12 Jam.....	70

ABSTRACT

Bengawan Solo river was polluted by chemical element heavy metal chromium (Cr) in an enormous number. The source of the Cr contaminant is come from industrial waste, domestic waste, burn of an engine and fuel mobilizations are poured into the water body. The hydrology cycle take the Cr and contaminate the shallow well, lake, and fish pool through the rain. A lots of concave land countour can caused precipitate of Cr, infiltrate and accumulate it into the ground. Cr is a toxic pollutant and harmful when it is accumulate in every living thing body. The medical impact of chromium i.e. cancer, the damage of bloody system, kidney and skin irritate. Remediation use electrokinetic depend on the direct current (DC) electricity through the ground is an effort to remove the Cr in this medium. The objectives in this research are to learn the phenomenon of electrokinetic remediation with 2D hexagonal configuration into the soil contaminated by Cr and identify the removal efficiency of chrome in to the soil. The process that occurred in this treatment is electromigration, electrolysis, electroosmosis, and electrophoresis.

The research methods of electrokinetic's remediation are used 40 volt and 0.2 Ampere direct current electricity. The concentration of Cr in medium is 500 $\mu\text{g/g}$ was prepered from simulation of caolinite from Godean area which contaminated by Cr_2O_3 . The medium weight is 150 kg and take place in the glass basin with the size of the basin are 1m x 0.95m x 1m. The remediation moment in this research take time as long as 12 hour. Electrode former battery with long 5 cm and diameter 0.8 cm is used as electrodes. The gap between electrodes is 15 cm with 2D hexagonal configuration.

The result of this research show, that the changes of pH and concentration of Cr was occurred. Initial pH averages are 2.4 and after the treatment it is changes in every sampling point. The pH at chatode area has an alkali conditions range from 8.4 to 10.2, while in anode area has an acid condition range from 3 to 5.4. The concentration Cr in the medium undergoes to remove from the initial concentration 500 $\mu\text{g/g}$ becomes 78.6 $\mu\text{g/g}$ and the removal efficiency is 78.13 %.

Keywords : chromium (Cr), electrokinetic remediation, electromigraation, electrolysis, electroosmosis and electrophoresis.

INTISARI

Sungai Bengawan Solo diketahui telah tercemar oleh logam berat kromium (Cr) dalam jumlah besar. Keberadaan logam berat tersebut umumnya berasal dari sisa aktivitas industri dalam bentuk limbah cair, kegiatan rumah tangga, pembakaran serta mobilisasi bahan bakar yang dibuang ke badan air. Ketika hujan turun, logam berat akan mengikuti daur hidrologis yang dapat mencemari sumur penduduk, danau, kolam yang kemudian bermuara ke laut. Kontur cekungan yang banyak menjadi daerah permukiman merupakan ancaman tertimbunnya logam berat Cr yang dapat terserap dan terakumulasi di dalam tanah, sehingga tanah dan air tanah pun menjadi tercemar. Sebagaimana telah diketahui bahwa kromium merupakan salah satu bahan pencemar yang bersifat racun dan berbahaya apabila terakumulasi dalam tubuh makhluk hidup. Dampak yang ditimbulkan diantaranya kanker, kerusakan sistem pembentukan darah, iritasi kulit dan kerusakan ginjal. Sebagai upaya untuk menghilangkan kontaminan Cr dalam tanah dapat dilakukan remediasi menggunakan elektrokinetik yang mengandalkan aplikasi arus DC pada media tanah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari fenomena remediasi elektrokinetik dengan konfigurasi 2D hexagonal pada tanah terkontaminasi Cr serta mengetahui efisiensi penurunan konsentrasi Cr tersebut dalam tanah. Proses-proses kimia yang terjadi pada remediasi ini yaitu elektromigrasi, elektrolisis, elektroosmosis, elektrophoresis

Metode penelitian remediasi elektrokinetik ini menggunakan tegangan 40 Volt dan 0,2 A DC. Tanah yang digunakan adalah simulasi tanah kaolinit Godean dengan Cr_2O_3 hingga konsentrasi Cr = 500 $\mu\text{g/g}$, berat tanah = 150 kg dan ditempatkan pada bak dari kaca berukuran 1 m x 0,95 m x 1 m. Waktu yang digunakan untuk remediasi tanah adalah selama 12 jam. Elektroda yang digunakan adalah elektroda karbon bekas batu baterai dengan panjang 5 cm dan diameter 0,8 cm. Jarak antar elektroda 15 cm dengan konfigurasi 2D hexagonal.

Penelitian menunjukkan, karena adanya proses-proses kimia tersebut maka terjadi perubahan pada pH dan konsentrasi Cr dalam tanah. Nilai pH awal rata-rata adalah 2,4 kemudian berubah di setiap area titik sampling. Perubahan pH pada setiap area mengakibatkan terjadinya perbedaan kondisi di tiap area. Pada area sekitar katoda memiliki kondisi basa dengan pH antara 8,4 sampai 10,2 sedangkan pada area anoda memiliki kondisi asam dengan nilai pH antara 3 sampai 5,4. Konsentrasi logam berat Cr dalam tanah mengalami penurunan dari konsentrasi awal 500 $\mu\text{g/g}$ menjadi konsentrasi terendah yaitu 78,6 $\mu\text{g/g}$ dengan nilai efisiensi sebesar 78,13 %.

Kata-kata kunci : kromium (Cr), remediasi elektrokinetik, elektromigrasi, elektrolisis, elektroosmosis, elektrophoresis.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Perkembangan industri yang semakin meningkat sangat berdampak positif bagi peningkatan kesejahteraan manusia untuk mendapatkan kualitas hidup yang lebih baik. Kemajuan yang sangat pesat dari industri serta teknologi yang diciptakan oleh manusia telah memberikan banyak kemudahan bagi manusia itu sendiri. Sebagai contoh kemajuan dalam bidang teknologi kimia yang diungkapkan dengan penemuan pestisida yang merupakan obat pemberantas hama pertanian. Contoh lain yaitu teknologi elektrik dan elektronik yang merangsang pertumbuhan pabrik-pabrik elektronika yang hasilnya dapat dinikmati oleh manusia dan semakin banyaknya pabrik tekstil yang akhirnya membuat Indonesia menjadi salah satu negara penghasil tekstil terbesar di dunia.

Namun dengan adanya kegiatan industri tersebut berdampak menghasilkan bahan-bahan sisa (limbah) sebagai hasil samping dari kegiatan industri yang menimbulkan efek negatif. Bahan-bahan sisa tersebut merupakan bahan buangan dari industri berteknologi tinggi yang mempunyai daya racun kuat sehingga berakibat buruk terhadap lingkungan dan manusia. Secara tidak sadar, gaya hidup modern telah mendorong manusia menelan dan menghirup lebih banyak racun. Racun

yang dibuat untuk membunuh hama dan penyakit atau terbuang sebagai sisa berbagai aktivitas manusia, menjadi bumerang yang mengancam jiwa.

Toksikan yang sangat berbahaya umumnya berasal dari buangan industri, terutama sekali dari industri kimia dan industri yang melibatkan logam berat dalam proses produksinya (Palar, 1994).

Pusat Penelitian Universitas Negeri Sebelas Maret (UNS), Surakarta, Jawa Tengah, baru-baru ini, menemukan kandungan logam berat seperti kromium (Cr) dan kadmium (Cd) di sepanjang aliran Sungai Bengawan Solo, melebihi ambang batas normal. Pencemaran terberat ditemukan di hulu aliran Bengawan Solo yang melintas di tiga kecamatan yang termasuk dalam Kabupaten Karanganyar, Jateng, yakni Jaten, Kebakkramat, dan Tasikmadu. Dari informasi tersebut, pencemaran sungai Bengawan Solo diduga berasal dari limbah cair dari pabrik-pabrik industri di kawasan itu. Industri itu meliputi pabrik tekstil, penyamakan kulit, *Mono Sodium Glutamate* (MSG)/vetsin, alkohol konveksi/batik, dan lain-lain. Menurut catatan pada 2001 di dekat Bengawan Solo ada 50 pabrik, 42 di antaranya di wilayah Karanganyar. Parahnya, air dari sungai yang membelah sembilan kabupaten dari Sukoharjo, Jateng, hingga Bojonegoro, Jawa Timur, itu masuk ke saluran irigasi. Akibatnya, kandungan Cd dan Cr dari limbah pabrik ikut terserap tanaman padi, tetapi tidak bisa diurai. Bahkan, kadar kromium sudah mencapai 3,8-7,5 miligram per kilogram. Untuk diketahui, limbah cair dari produksi

biasanya mengandung nitrogen sehingga dampak sesaatnya padi menjadi subur (Solikun, 2004).

Pada industri tekstil, kromium (Cr) banyak dipergunakan dalam proses pewarnaan disamping logam lain misalnya kadmium dan tembaga. Masalah yang sering terjadi dari proses pewarnaan ini yaitu berupa tumpahan bahan-bahan selama proses berlangsung maupun sisa dari proses pewarnaan. Sebagaimana telah diketahui bahwa kromium merupakan salah satu bahan pencemar yang bersifat racun dan berbahaya apabila terakumulasi dalam tubuh makhluk hidup. Akibat yang ditimbulkan diantaranya kanker, kerusakan sistem pembentukan darah, iritasi kulit dan kerusakan ginjal (Palar, 1994).

Tanah merupakan salah satu medium alami untuk pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme yang tersusun dari bahan organik dan anorganik. Kemampuan mikroorganisme dalam menguraikan bahan organik dan anorganik menjadi senyawa yang lebih sederhana (proses respirasi), selain ditentukan oleh jumlah dan jenis mikroorganisme tanah juga ditentukan oleh kondisi kimiawi tanah. Adanya bahan pencemar berupa logam berat dalam tanah yang bersifat toksik misalnya Hg, Cu, Cr Pb, pada konsentrasi tertentu dapat menghambat pertumbuhan dan aktifitas respirasi mikroorganisme (Parizek, 1978). Selain itu logam-logam berat di tanah mengalami transport mengikuti aliran air tanah menyebar ke tempat yang lebih rendah dalam waktu yang lama sehingga dapat mencemari air tanah.

Pada musim hujan, banjir mempunyai dampak ekologi cukup besar karena dapat membawa air sungai yang mengandung limbah logam berat yaitu salah satunya ke lingkungan daratan dalam hal ini tanah. Limbah logam berat yang terbawa banjir tersebut terserap dan terakumulasi di dalam tanah sehingga tanah menjadi tercemar.

Untuk mengatasi permasalahan lingkungan tersebut khususnya pada pencemaran tanah perlu dilakukan upaya pengolahan dan pengelolaan. Salah satunya yaitu dengan upaya pemulihan (remediasi) tanah yang sudah terkontaminasi.

Pemulihan tanah secara elektokinetik merupakan salah satu upaya pemulihan tanah yang terkontaminasi oleh logam berat seperti Cr, Hg, Cu dan kontaminan organik lainnya secara *in situ*. Teknologi remediasi tersebut dalam penerapannya menggunakan biaya yang rendah dan sangat potensial digunakan untuk berbagai tipe kontaminan (Donald *and* Debra, 1994).

1.2 PERUMUSAN MASALAH

1. Apakah tanah terkontaminasi logam berat Cr dapat diremediasi dengan metode elektrokinetik.
2. Nilai efisiensi penurunan logam berat Cr yang didapat setelah dilakukan pemulihan secara elektrokinetik.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

1. Mempelajari fenomena elektro remediasi pada tanah terkontaminasi logam berat Cr dengan menggunakan teknik elektrokinetik konfigurasi 2D *hexagonal*.
2. Mengetahui efisiensi penurunan konsentrasi logam berat Cr pada tanah dengan menggunakan teknik elektrokinetik.

1.4. MANFAAT PENELITIAN

1. Untuk menambah wawasan ilmu pengetahuan tentang remediasi tanah khususnya mengenai remediasi dengan teknik elektrokinetik.
2. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai informasi bagi masyarakat dan industri.

1.5. BATASAN MASALAH

1. Analisa parameter logam berat Cr pada tanah terkontaminasi.
2. Remediasi elektrokinetik dengan konfigurasi 2 dimensi *hexagonal*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. LAPISAN TANAH

Tanah merupakan bagian tertipis dari seluruh lapisan bumi, tetapi pengaruhnya terhadap kehidupan sangat besar. Tanah adalah tempat produksi sebagian besar makanan bagi makhluk hidup. Tanah terdiri atas berbagai lapisan yang disebut horison-horison. Dengan demikian dikenal lapisan atas atau horison A atau *top soil*, di bawahnya ada horison B atau *sub soil*, dan kemudian didapat horizon C yang terdiri atas hasil pelapukan buatan, dan di bawahnya lagi terdapat batu-batuan atau *bedrock* (Manahan, 1972)

Tanah pada umumnya gembur, terdiri atas mineral padat, zat organik (5%), air, dan ruang-ruang udara. Sifat-sifat inilah yang memungkinkan terjadinya interaksi antara litosfir, atmosfer, hidrosfir, dan biosfir. Kegemburan memungkinkan penetrasi akar tumbuhan dan bersarangnya hewan, adanya aerasi atau pertukaran antara gas oksigen dan karbondioksida yang diperlukan sangat menopang bagi kelangsungan hidup hewan dan tumbuhan. Udara di dalam tanah terdapat sebanyak 25 % volume, kadar oksigennya lebih rendah daripada kadar oksigen di atmosfer, karena telah dimanfaatkan oleh mikroba aerob untuk menguraikan zat-zat organik. Dengan demikian, *carbondioxida* dalam

tanah pun jauh lebih banyak (beberapa ratus kali) daripada yang ada di dalam atmosfer (Manahan, 1972).

Jenis dan jumlah zat organik yang ada di dalam tanah sangat tergantung dari suhu, oksigen, dan zat organik di sekitarnya. Di daerah tropis, dimana temperatur cukup tinggi, proses penghancuran zat organik dapat berjalan lebih cepat dan apabila garam-garam hasil penguraian ini dapat mudah mengalir masuk lapisan yang lebih dalam, maka tanah di daerah sedemikian menjadi cepat tidak subur. Jenis tanah serta kandungannya juga menentukan kapasitas pertukaran ion, yang menjadi penting dalam proses terjadinya pencemaran tanah, terutama pencemaran zat kimia dan logam-logam. Baik bagian mineral dan bagian organik saling bertukar kation. Tanah liat sebagai mineral menukar kationnya apabila tersedia tempat-tempat yang bermuatan negatif sebagai akibat dari substitusi atom dengan nomor oksidasi yang lebih rendah dengan nomor oksidasi yang lebih tinggi, misalnya penukaran magnesium terhadap aluminium. Proses pertukaran kation inilah yang biasanya memelihara ketersediaan mineral (K,Ca,Mg) untuk tanaman. Proses yang sama pula yang memungkinkan tertahannya sejumlah logam di dalam tanah, sehingga terjadi pencemaran. Apabila logam tadi dipakai oleh akar tanaman, maka sebagai gantinya didapat ion hidrogen. Proses ini bersama dengan melarutnya Ca, Mg, dan lain-lainnya dalam tanah yang mengandung asam karbonat, cenderung membuat tanah menjadi asam.

2.2. SIFAT KIMIA DAN FISIS TANAH

2.2.1. Sel Elektrokimia dan Potensial Kimia

Sistem tanah merupakan tempat penyimpanan hampir semua unsur hara yang diperlukan tanaman dan juga mengandung permukaan-permukaan aktif yang menentukan konsentrasi ion di dalam larutan tanah. Gerakan ion, akumulasi, ketersediaan unsur dan penyerapannya oleh tanaman, perubahan dalam tingkat oksidasi dan reduksi suatu unsur dan banyak lagi reaksi kimia yang lain di dalam tanah adalah reaksi-reaksi yang hingga tingkat tertentu mirip dengan yang terjadi di dalam sel elektrokimia. Di dalam kimia murni dikenal 2 jenis sel elektrokimia, yaitu (a). Sel galvanik atau voltaik dan (b). sel elektrolitik. Sel galvanik terdiri dari 2 elektroda dan 1 atau lebih larutan (dua sel-paruh). Jenis ini mampu secara spontan mengubah energi kimia dari larutan ke energi listrik dan menyalurkannya ke suatu sumber. Batere mobil (aki) merupakan suatu contoh dari jenis sel galvanik. Dalam sel elektrolit, energi listrik disediakan dari suatu sumber luar. Perubahan-perubahan elektrokimia dihasilkan pada antar permukaan elektrode-larutan, dan perubahan konsentrasi terjadi dalam sistem larutan. Jika arus listrik di luar diputus, sistem ini akan cenderung menghasilkan arus elektron dengan arah yang berlawanan. Gaya tarik listrik luar terendah yang harus diberikan untuk menghasilkan pemisahan antara kation dan anion (elektrolisis) secara terus menerus disebut voltase dekomposisi (Kim, 1998).

2.2.2. Larutan Tanah

Sistem tanah tersusun oleh 3 fase : (1). Padat, (2). Cair, (3). Gas. Fase padat merupakan campuran mineral dan bahan organik dan membentuk jaringan kerangka tanah. Dalam jaringan ini terbungkus sistem ruang pori, yang ditempati bersama oleh fase cairan dan gas. Komposisi dan perilaku kimia fase cairan dan gas ditentukan oleh interaksinya dengan fase padat. Fase gas atau udara tanah merupakan campuran dari berbagai gas. Kebanyakan reaksi biologi di dalam tanah menggunakan oksigen dan menghasilkan karbondioksida. Fase cairan, yang juga disebut larutan tanah terdiri atas air dan zat-zat terlarut. Larutan tanah merupakan tempat berendam akar tanaman dan merupakan sumber perolehan unsur hara inorganik dan air bagi akar dan organisme lainnya (Kim, 1998).

2.2.3. Kimia Koloid Bahan Penyusun Tanah

2.2.3.1. Kimia Permukaan Lempung Tanah

Banyak reaksi kimia dari lempung tanah merupakan gejala permukaan, misalnya pertukaran kation.. Permukaan lempung dapat dibagi dalam 3 kategori yaitu :

1. Permukaan yang terbentuk terutama oleh rangkaian Si-O-Si dari tetrahedron silika,
2. Permukaan yang terbentuk oleh rangkaian O-Al-OH dari oktahedron alumina, dan

3. Permukaan yang terbentuk oleh $-\text{Si-OH}$ atau $-\text{Al-OH}$ dan senyawa-senyawa amorf.

Kategori permukaan pertama dicirikan oleh bidang-bidang permukaan yang terbentuk oleh atom-atom oksigen, yang dilapis bawah oleh atom-atom silikon dari tetrahedron. Tipe permukaan ini cocok disebut sebagai permukaan "siloksana dank has" untuk tipe lempung 2:1.

Tipe kedua, permukaan mineral lempung dicirikan oleh bidang gugus hidroksil (OH) yang terbuka, dilapis bawah oleh atom-atom Al, Fe, atau Mg pada pusat oktahedron dengan lempung tipe 1:1.

Tipe permukaan yang ketiga dibentuk oleh $-\text{Si-OH}$, yang disebut permukaan silanol dan $-\text{Al-OH}$ disebut permukaan aluminol. Tipe-tipe tersebut khas dijumpai pada tanah-tanah yang banyak mengandung gel silika amorf dan /atau alofan. Biasanya senyawa dengan permukaan silanol dan aluminol mempunyai luas permukaan yang besar, sedang semua gugus hidroksil dapat dengan mudah dicapai (Kim, 1998).

2.2.3.2. Asal Muatan Negatif dalam Mineral Lempung

Lempung tanah biasanya mengandung muatan elektronegatif, yang memungkinkan terjadinya reaksi pertukaran kation. Muatan ini merupakan hasil dari satu atau lebih dari beberapa reaksi yang berbeda. Dua sumber utama bagi asal usul muatan negatif dalam mineral lempung adalah sebagai berikut :

a. Substitusi Isomorfik

Proses ini dianggap sebagai sumber utama muatan negatif dalam lempung lapis 2:1. Sebagian dari silikon dalam lapisan tetrahedral dapat diganti oleh ion yang berukuran sama, yang biasanya adalah Al^{3+} . Dengan cara yang sama, sebagian dari Al dalam lembar oktahedral dapat diganti oleh Mg^{2+} , tanpa mengganggu struktur kristal. Proses pergantian semacam ini disebut substitusi isomorfik. Muatan negatif yang dihasilkan dianggap sebagai muatan permanen, karena tidak berubah dengan berubahnya pH.

b. Disosiasi dari Gugus Hidroksi yang Terbuka

Keberadaan gugus OH pada tepi kristal atau pada bidang yang terbuka, dapat juga menimbulkan muatan negatif. Khususnya pada pH tinggi, hidrogen dari hidroksil tersebut terurai sedikit dan permukaan lempung menjadi bermuatan negatif, yang berasal dari ion oksigen. Muatan negatif tipe ini disebut muatan berubah-ubah atau muatan tergantung pH dan tipe koloid. Jenis muatan ini sangat penting pada lempung tipe 1:1, lempung oksidasi besi aluminium dan koloid organik (Kim, 1998).

2.2.3.3. Lapisan Rangkap Listrik

Akibat adanya muatan elektronegatif, lempung dalam suspensi dapat menarik kation. Ion-ion bermuatan positif tidak secara seragam dalam seluruh medium dispersi. Mereka ditahan pada atau dekat

permukaan lempung. Sebagian kation tersebut bebas unruk dipertukarkan dengan kation yang lain. Dengan demikian muatan negatif pada permukaan lempung ditutupi oleh sekumpulan dari ion lawan yang bermuatan positif. Muatan negatif pada permukaan lempung beserta kumpulan ion lawan yang bermuatan positif disebut lapisan rangkap listrik. Lapisan pertama dari lapisan rangkap tersebut terbentuk dari muatan pada permukaan lempung. Secara teknis muatan tersebut berupa muatan titik yang terlokalisasi. Akan tetapi, kita biasanya menganggap muatan ini pada permukaan lempung.

Lapisan kedua dari lapisan rangkap tersebut berada dalam lapisan cair yang berdekatan dengan permukaan lempung. Ion lawan positif dalam lapisan ini tertarik pada permukaan lempung, tetapi pada waktu bersamaan mereka bebas menyebar secara merata dalam keseluruhan fase larutan (Kim, 1998).

2.2.4. Pertukaran Kation

Oleh karena koloid lempung menyandang muatan negatif, kation-kation tertarik oleh partikel lempung. Kation-kation tersebut diikat secara elektrostatik pada permukaan lempung. Kebanyakan dari kation-kation ini bebas menyebar di dalam fase larutan dengan difusi. Kation-kation ini disebut kation terjerap. Istilah pertukaran kation lebih disukai dari pada istilah pertukaran basa karena reaksinya juga melibatkan ion H^+ . Ion hidrogen adalah suatu kation, tetapi bukan basa. Kation-kation yang

terjerap dapat dipertukarkan dengan kation lainnya. Proses penggantian ini disebut pertukaran kation.

2.2.5. Pertukaran Anion

Muatan positif dapat terjadi pada tepi-tepi mineral lempung. Muatan jenis ini biasanya mempunyai nilai pH di bawah titik isoelektrik atau muatan titik nol. Oleh karena itu, permukaan tepi yang patah dari suatu lembar oktahedra mempunyai lapisan rangkap bermuatan positif pada pH rendah. Lapisan rangkap ini makin bersifat positif dengan menurunnya pH.

2.2.6. Lempung Kaolinit

Mineral kaolinit adalah alumino-silikat terhidrasi dengan komposisi kimia umum $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:2:2$, atau $2 \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ per sel unit. Seperti yang dinyatakan sebelumnya, secara struktural mineral lempung ini tergolong tipe filosilikat tipe 1:1.

Substitusi isomorfik hanya sedikit dan muatan permanen tiap sel satuan, jika tidak nol, sangat kecil. Akan tetapi akibat kehadiran gugus hidroksil yang terbuka, kaolinit mempunyai muatan negatif yang berubah-ubah, atau tergantung pH. Seperti yang dapat diperhatikan dari strukturnya, posisi dari gugus OH membuka kemungkinan untuk disosiasi H^+ , yang merupakan penyebab terbentuknya muatan berubah-ubah,

terutama bidang gugus hidroksil pada permukaan terbuka dari situs oktahedra. Kapasitas tukar kation sangat rendah dan berubah dengan pH.

Partikel kaolinit tidak mudah dihancurkan sehingga merupakan penyebab sifat-sifat plastisitas dan daya mengerut dan mengembang yang rendah. Luas permukaannya yang sempit membatasi kapasitas tukar kation. Luas permukaan spesifiknya adalah sekitar 7 sampai 30m²/g (Kim, 1998).

2.3. KIMIA TANAH

Hampir 90% kandungan dalam tanah berisi bahan-bahan mineral. Kandungan mineral yang ada terbagi atas mineral primer dan mineral sekunder. Mineral primer berasal dari batuan induk, mengandung banyak pasir dan lanau, misalnya kuarsa dan mika. Mineral sekunder berada dalam fraksi liat. Elemen yang terkandung dalam mineral tanah berada dalam berbagai bentuk yang merupakan suatu keseimbangan komplek. Hasil akhir kesetimbangan ini adalah garam-garam terlarut dan elemen-elemen yang teradsorpsi yang keberadaannya menyatakan keberadaan nutrien tanah (Kim, 1998).

2.4. PENCEMARAN TANAH

Tidak jauh beda dengan udara dan air, tanah pun dapat mengalami pencemaran. Tanah mengalami pencemaran apabila ada bahan-bahan asing baik yang bersifat organik maupun anorganik berada di dalam

2.5. PENCEMARAN LOGAM BERAT dalam TANAH

Pencemaran logam berat dalam tanah erat kaitannya dengan pencemaran udara dan air. Partikel logam berat yang berterbangan di udara akan terbawa oleh air hujan yang membasahi tanah sehingga timbul pencemaran tanah. Derajat keasaman tanah adalah faktor utama dalam ketersediaan logam berat dalam tanah. Tanah yang asam akan menaikkan pembebasan logam berat dalam tanah. Naiknya ketersediaan logam berat dalam tanah dapat meningkatkan kandungan logam berat dalam tanah. Akumulasi logam berat dalam tanah tidak hanya tergantung pada kandungan dalam tanah tetapi juga tergantung pada unsur kimia tanah, jenis logam berat dan spesies tanaman.

Pencemaran yang dihasilkan dari logam berat sampai tingkat tertentu dapat mengganggu kesehatan manusia.

2.6. KHROMIUM (Cr)

2.6.1. Penyebaran, Sifat dan Penggunaan

Kata khromium berasal dari bahasa Yunani (*=Chroma*) yang berarti warna. Dalam bahan kimia, khromium dilambangkan dengan "Cr". Sebagai salah satu unsur logam berat, khromium mempunyai nomor atom (NA) 24 dan mempunyai berat atom (BA) 51.996. Logam Cr pertama kali ditemukan oleh *Vagueine* pada tahun 1797. Satu tahun setelah unsur ini ditemukan, diperoleh cara untuk mendapatkan logam Cr.

Logam Cr murni tidak pernah ditemukan di alam. Logam ini di alam ditemukan dalam bentuk persenyawaan padat atau mineral dengan unsur-unsur lain. Sebagai bahan mineral, Cr paling banyak ditemukan dalam bentuk "*Chromite*" (FeOCr_2O_3). Kadang-kadang pada batuan mineral *chromite* juga ditemukan logam-logam Mg (magnesium), Al (aluminium), dan senyawa SiO_2 (silikat). Logam-logam dan senyawa silikat tersebut dalam mineral *chromite* bukanlah merupakan penyusunan pada *chromite* melainkan berperan sebagai "pengotor" (*impurities*).

2.6.2. Cr dalam Lingkungan

Logam Cr dapat masuk ke dalam semua strata lingkungan. apakah itu pada strata perairan, tanah atau pun udara (lapisan atmosfer). Khromium yang masuk ke dalam strata lingkungan dapat datang dari bermacam-macam sumber. Tetapi sumber-sumber masukan logam Cr ke dalam strata lingkungan yang umum dan diduga paling banyak adalah dari kegiatan-kegiatan perindustrian, kegiatan rumah tangga dan dari pembakaran serta mobilisasi bahan bakar.

Sumber utama masuknya Cr ke lapisan udara dari suatu strata lingkungan adalah dari pembakaran dan mobilisasi batu bara dan minyak bumi. Dari pembakaran yang dilakukan terhadap batu bara akan dilepaskan Cr ke udara sebesar 10 ppm. Sedangkan dari pembakaran minyak bumi akan dilepaskan Cr ke udara sebesar 0.3 ppm. Keadaan ini dapat diartikan bahwa setiap tahunnya akan dilepas sebanyak 1.400 ton Cr

ke udara yang berasal dan proses pembakaran batu bara, dan sebanyak 50 ton Cr yang berasal dan proses pembakaran dengan menggunakan minyak bumi.

Khromium di dalam strata udara ditemukan dalam bentuk debu dan atau partikular-partikular. Debu-debu atau partikular-partikular Cr yang ada dalam strata lapisan udara tersebut akan dapat masuk ke dalam tubuh hewan dan manusia ketika berlangsungnya kegiatan respirasi (pernafasan). Partikel-partikel atau debu-debu Cr yang terhirup manusia lewat rongga hidung, mengikuti jalur-jalur respirasi sampai ke paru-paru untuk kemudian akan berikatan dengan darah di paru-paru sebelum dibawa darah ke seluruh tubuh (Palar,1994).

2.7. REMEDIASI TANAH

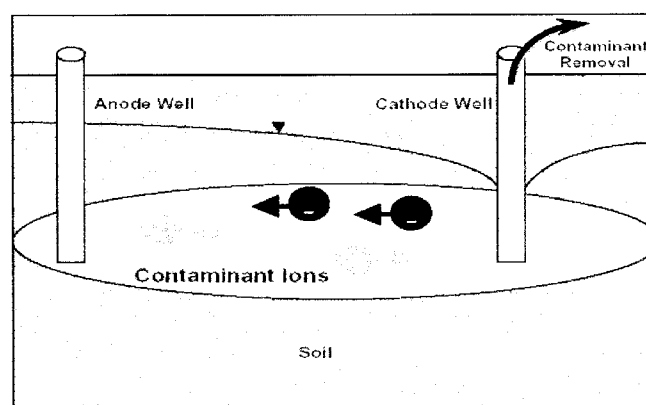
Remediasi berasal dari bahasa Inggris *remediation* yang berarti pemulihan (Echols, 1990). Remediasi tanah atau *soil remediation* adalah pemulihan tanah yang terkontaminasi oleh zat-zat pencemar seperti logam berat dan atau senyawa organik untuk mengembalikan fungsi tanah sehingga dapat dimanfaatkan kembali dan tidak menimbulkan masalah bagi lingkungan.

Menurut Evanko (1997), teknologi remediasi secara umum dapat dilakukan dengan isolasi, immobilisasi, reduksi toksisitas, pemisahan fisis dan ekstraksi. Teknologi secara ekstraksi untuk remediasi tanah antara

lain : *soil washing*, *phyrometallurgical*, *in situ soil flushing* dan *electrokinetic treatment*.

2.8. REMEDIASI ELEKTROKINETIK

Remediasi secara elektrokinetik merupakan teknologi pemulihan tanah terkontaminasi logam berat dan senyawa-senyawa organik melalui proses secara *in-situ* dengan menggunakan tegangan listrik rendah dan arus DC (*direct current*) pada potongan melintang area antara elektroda yang diletakkan pada tanah dengan susunan aliran terbuka. Tekanan aliran pada umumnya digolongkan dalam miliampere per sentimeter kuadrat (mA/cm^2) atau beda potensial tegangan listrik volt per sentimeter. Dengan penerapan teknologi tersebut diharapkan kontaminan logam berat dalam tanah dapat dipindahkan/digerakkan, dipadatkan/dipekatkan oleh elektroda serta diekstraksikan dari tanah, yang secara skematik dapat dilihat pada **Gambar 2.1** (Alshwabkeh, 2001).



Gambar 2.1. Prinsip Dasar Remediasi Elektrokinetik
Sumber : Alshwabkeh, 2001

Elektrokinetik merupakan penggunaan medan listrik pada media tanah agar air, ion-ion, molekul-molekul polar serta zat-zat pencemar di dalamnya dapat digerakkan/ berpindah.(Pamukcu, 1994).

Pada teknologi ini, elektroda-elektroda ditempatkan pada tanah secara vertikal maupun horizontal. Ketika arus DC digunakan pada elektroda, dihasilkan tanah yang terpengaruh medan listrik oleh katoda dan anoda. Penggunaan sistem tersebut pada tanah mempunyai beberapa efek/akibat yaitu : *electromigration*, *electroosmosis*, *electrolysis*, dan *electrophoresis*. *Electromigration*, yaitu pergerakan kation dan anion karena pengaruh sifat listrik yang ditimbulkan sistem tersebut pada tanah. Kation (ion bermuatan +) cenderung untuk berpindah ke arah katoda bermuatan negatif, dan anion (ion bermuatan -) berpindah ke arah anoda bermuatan positif. Pada penyelesaiannya, ion-ion yang dipekatkan/dipadatkan tersebut akan mendekati elektroda atau mengalami reaksi pada elektroda, dimana logam-logam pencemar tersebut naik ke arah elektroda atau melepaskan komponen berbentuk gas. *Electrolysis* merupakan reaksi kimia yang terjadi dengan medan listrik. Perubahan pH karena pengaruh arus merupakan reaksi elektrolisis pada elektroda. Terjadinya oksidasi air pada anoda dan menghasilkan ion-ion hidrogen (H^+). Ion-ion H^+ tersebut membangkitkan asam untuk berpindah menuju katoda. Sebaliknya, penurunan air terjadi pada katoda dan menghasilkan ion-ion *hidroxyl* (OH^-) yang kemudian berpindah sebagai dasar ke arah anoda (Acar dkk, 1990).

Transport pada ion-ion H^+ diperkirakan 2 kali lebih cepat daripada ion-ion OH^- . Dengan demikian, gerakan asam rata-rata lebih besar daripada basa. *Electroosmosis* adalah proses transport air dalam jumlah besar yang terus mengalir pada tanah di bawah pengaruh gradien listrik. *Electrophoresis* merupakan pergerakan partikel-partikel karena pengaruh medan listrik (Acar and Alshwabkeh, 1993).

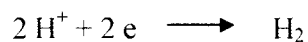
2.8.1. Reaksi-reaksi pada Katoda

Reaksi pada katoda adalah reduksi terhadap kation, jadi yang perlu diperhatikan adalah kation saja.

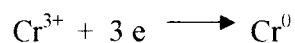
- a. Jika larutan mengandung ion-ion logam alkali, ion-ion logam alkali tanah, ion-ion Al^{3+} dan ion Mn^{2+} , maka ion-ion logam ini tidak dapat direduksi dari larutan. Yang mengalami reduksi adalah pelarut dan terbentuklah gas hydrogen (H_2) pada katoda.



- b. Jika larutan mengandung asam, maka ion H^+ dari asam akan direduksi menjadi gas hidrogen (H_2) pada katoda.



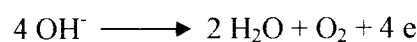
- c. Jika larutan mengandung ion-ion logam yang lain, maka ion-ion logam ini akan direduksi menjadi masing-masing logamnya dan logam yang terbentuk itu diendapkan pada permukaan batang katoda.



2.8.2. Reaksi-reaksi pada Anoda

Reaksi pada anoda adalah oksidasi terhadap anion. Jadi yang perlu diperhatikan adalah anion saja.

- a. Ion-ion halida (F^- , Cl^- , Br^- , I^-) akan dioksidasi menjadi halogen-halogen.
- b. Ion OH^- dari basa akan dioksidasi menjadi gas oksigen (O_2).



- c. Anion-anion yang lain (SO_4^{2-} , NO_3^- , dsb) tidak dapat dioksidasi dari larutan. Yang akan mengalami oksidasi adalah pelarut (air) dan terbentuklah gas oksigen (O_2) pada anoda (Setiono, 1990).



2.8.3. Tipe Lempung

Hasil yang didapatkan dari *bench-scale laboratory* dan percobaan skala lapangan mengindikasikan bahwa teknologi elektrokinetik ini dapat sukses diaplikasikan pada *clayey* (lempungan) sampai tanah *fine sandy* (pasiran halus). Hal ini menunjukkan bahwa tipe tanah bukan merupakan batasan yang signifikan. Bagaimanapun, kecepatan transport kontaminan dan efisiensinya tergantung pada tipe tanah dan variabel lingkungan. Tanah dengan aktifitas tinggi, seperti *illite*, *montmorillonite* dan *kaolinit* menunjukkan tingginya buffer asam/basa dan memerlukan asam berlebih dan perantara peningkat untuk *desorb* dan pelarutan kontaminan *sorbed* pada permukaan partikel tanah sebelum mereka dapat mentransportkan

keluar *subsurface* (bawah permukaan) dan *removal*. Teknologi ini dapat diaplikasikan untuk mengolah lapisan tanah *heterogenous* secara efektif (Alshwabkeh,1999).

Sistem air, partikel, elektrolit tanah lempung pada umumnya terdiri dari 3 zone berbeda : butiran partikel tanah liat dengan permukaan bermuatan negatif, pori-pori aliran dengan muatan positif berlebih dan pori-pori bebas aliran dengan jaringan muatan nol. Muatan jaringan negatif pada permukaan partikel lempung memerlukan suatu muatan positif berlebih (kation dapat ditukarkan) yang didistribusikan ke dalam zone cairan yang bersebelahan dengan permukaan tanah lempung membentuk difusi lapisan ganda (*double layer*). Kuantitas kation-kation yang dapat ditukarkan ini diperlukan muatan penyeimbang *deficiency* tanah liat yaitu dengan memasukkan kapasitas pertukaran kation dan dinyatakan dalam milliequivalents per 100 gram dari tanah lempung kering (Alshwabkeh, 2001).

2.8.4. Tipe Kontaminan dan Konsentrasi

Teknologi elektrokinetik ini dapat digunakan untuk menghilangkan logam berat, radionuklida dan organik. *Removal* organik *non polar* fase bebas dimungkinkan jika mereka berada sebagai gelembung kecil yang dapat dibawa oleh adveksi elektroosmosis. Kontaminan dalam bentuk koloid dapat juga dihilangkan dengan efek kombinasi *electroosmotic advection* dan *electroporetic migration*. Tingginya konsentrasi ion dalam

pori-pori akan menambah konduktivitas listrik tanah dan mengurangi efisiensi aliran elektroosmotik. Kuatnya aplikasi medan listrik harus dikurangi untuk mencegah konsumsi energi berlebih dan berlangsungnya pemanasan selama proses. Konsentrasi kontaminan berlebih bukan merupakan halangan untuk mengaplikasikan proses tersebut (Alshwabkeh, 1999).

2.8.5. Tingkatan Voltase dan Arus

Intensitas arus listrik yang digunakan sebagian besar studi ini adalah beberapa puluh mA/cm². Intensitas arus tinggi, dapat menjadikan lebih asam dan menambah laju transport untuk memfasilitasi proses *removal* kontaminan. Rapat arus (*current density*) berada dalam kisaran antara 1-10 A/m² telah didemonstrasikan lebih efisien. Bagaimanapun, pemilihan rapat arus dan kuat medan listrik tergantung pada sifat-sifat elektrokimia dari tanah yang akan diolah dan konduktivitas partikel listrik. Tingginya konduktivitas listrik tanah menunjukkan tingginya rapat arus yang dibutuhkan untuk mengatur kekuatan medan listrik yang dibutuhkan. Kuat medan listrik yang biasa digunakan kurang lebih 50 V/m untuk menunjukkan estimasi proses (Alshwabkeh, 1999).

2.8.6. Kimia Efluen

Kontaminan berada dalam bentuk kimia yang berbeda dalam *subsurface* dan tergantung pada kondisi lingkungan. Mereka dapat berupa

presipitasi padatan, padatan terlarut dalam pori-pori atau air tanah, *komplex sorbed* pada permukaan partikel tanah, dan atau jenis ikatan organik dalam tanah. Dalam perbedaan bentuk ini, hanya padatan terlarut dapat bergerak dan dihilangkan dengan ekstraksi elektrokinetik dan beberapa teknologi remediasi yang lain. Untuk meningkatkan kinerja proses dapat juga ditambahkan zat kimia spesifik untuk tanah yang spesifik pula, penambahan ini akan merubah karakteristik serapan pula, penambahan ini harus melalui uji laboratorium, karena penambahan yang salah akan mempersulit proses remediasi (Alshwabkeh, 1999).

2.8.7. Material, Konfigurasi dan Spasi Elektroda

a. Material Elektroda

Bahan kimia yang tidak bereaksi dan bahan yang bisa menghantarkan listrik seperti *grafit*, *coated titanium* atau *platinum* bisa digunakan sebagai anoda untuk menahan dissolusi elektroda dan berlangsungnya pengkaratan dalam kondisi asam.

b. Konfigurasi Elektroda

Konsentrasi elektroda memberikan perubahan solusi antara elektroda dan lingkungan bawah permukaan yang penting untuk ketepatan fungsi proses. Sebagian besar *bench-scale* dan skala besar laboratorium dan *pilot* skala lapangan pada studi remediasi elektrokinetik menggunakan konfigurasi satu dimensi (1D). Keefektifan dan efisiensi penggunaan remediasi elektrokinetik skala lapangan meliputi konfigurasi elektroda

yang optimal, pemakaian konfigurasi elektroda satu dimensi (1D), dua dimensi (2D), atau *aximetical*. Pembatasan pada penelitian ini pada pemakaian konfigurasi elektroda 2D.

Untuk konfigurasi elektroda 1D, plat elektroda dapat dipasang di lapangan dengan prosedur yang sama dengan instalasi sumbu aliran, dapat juga menggunakan batang elektroda yang dibariskan dan menancap pada tanah. Konfigurasi ini membangun titik-titik medan listrik yang *inactive* (mati). Konfigurasi elektroda 2D meliputi *triangular*, *square* dan *hexagonal*, perbedaan bentuk pada konfigurasi 1D dengan 2D dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Pada penelitian ini menggunakan bentuk susunan *hexagonal* yaitu sesuai dengan penelitian terdahulu dimana didapatkan bahwa konfigurasi elektroda 2D *hexagonal* lebih efisien untuk menurunkan kontaminan Cu dalam tanah dibandingkan dengan bentuk dan susunan *triangular* ataupun *square*. Dalam konfigurasi elektroda *hexagonal*, elektroda-elektroda membentuk lubang sarang lebah, berisi katoda yang dikelilingi enam anoda (Chan *and* Lynch, 2002).

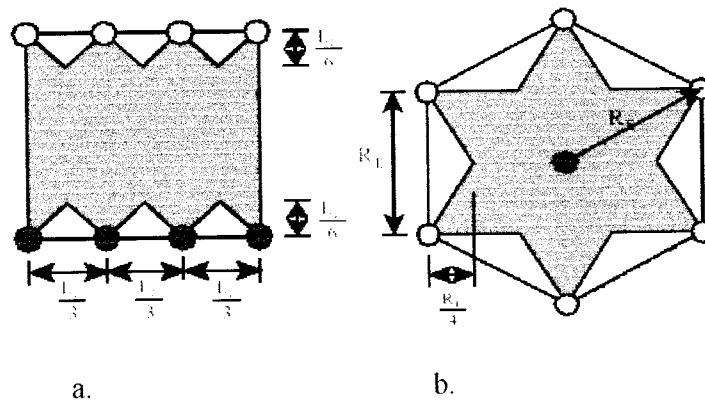
Konfigurasi *hexagonal* ini, katoda ditempatkan di tengah dan anoda ditempatkan pada batas pinggir untuk memaksimalkan penyebaran lingkungan asam yang dibangkitkan dengan anoda dan meminimalkan perluasan lingkungan basa yang dibangkitkan dengan katoda. Titik-titik *inactive* (mati) medan listrik dalam konfigurasi 2D tetap terbentuk, namun lebih kecil dibanding yang terbangun pada 1D yang berisi garis paralel anoda dan katoda. Dalam konfigurasi 1D, rapat arus (*current density*)

lokasinya bebas. Dalam konfigurasi 2D, rapat arus bertambah secara linear dengan jarak menuju katoda. Kuatnya medan listrik juga bertambah secara linear dengan jarak menuju katoda.

c. Jarak Elektroda

Faktor yang mempengaruhi pemilihan spasi elektroda meliputi :

1. Biaya
2. Waktu yang diperlukan (Alshawabkeh,1999).



Gambar 2.2. Konfigurasi elektroda : a). 1-D b). 2-D *hexagonal*
Sumber : Alshawabkeh, 2001

2.9. LANDASAN TEORI

Tanah merupakan tempat penyimpanan semua unsur hara yang diperlukan tanaman dan juga mengandung permukaan-permukaan aktif yang menentukan konsentrasi ion di dalam tanah. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah, pada tingkat-tingkat tertentu memiliki kemiripan dengan reaksi di dalam sel elektrokimia, seperti gerak ion, perubahan oksidasi reduksi, ketersediaan unsur serta penyerapannya.

Mineral-mineral lempung terjadi dalam partikel-partikel berukuran kecil dan terbuat dari lapisan sel satuan berulang. Lempung mengandung muatan elektronegatif, yang merupakan hasil dari satu atau lebih beberapa reaksi yang berbeda. Akibat dari muatan tersebut lempung dapat menarik kation yang tidak teragih secara seragam dalam seluruh medium dispersi. Mereka ditahan pada atau dekat permukaan lempung. Sebagian kation tersebut bebas untuk dipertukarkan dengan kation yang lain, dengan demikian muatan negatif pada permukaan lempung ditutupi oleh sekumpulan ekivalen dari ion lawan bermuatan positif. Muatan negatif pada permukaan lempung beserta kumpulan ion lawan yang bermuatan positif disebut lapisan rangkap listrik.

Elektrokinetik menggambarkan pengangkutan muatan secara fisik-kimia, aktivitas muatan partikel dan efek tegangan elektrik yang diterapkan dalam formasi dan pengangkutan partikel pada media berpori. Kehadiran difusi lapisan ganda memberi kenaikan pada beberapa gejala elektrokinetik dalam tanah, yang mana dapat diakibatkan oleh pergerakan lapisan ganda pada tahap yang berbeda satu sama lain yang mencakup pengangkutan muatan atau pergerakan lapisan ganda pada tahap yang berbeda satu sama lain dalam kaitannya dengan penggunaan medan elektrik. Gejala elektrokinetik meliputi elektroosmosis, elektrophoresis, arus potensial dan potensial pengendapan.

Prinsip remediasi tanah secara elektrokinetik menggunakan arus DC intensitas rendah melalui tanah yang terkontaminasi dengan dua atau

lebih elektroda. Dimana arus listrik yang dialirkan melalui katoda yang dihubungkan ke dalam tanah untuk membangun medan listrik menyebabkan transport kontaminan dengan elektroosmosis dan migrasi ion. Pergerakan elektroosmosis merupakan pergerakan cairan melalui pori-pori karena pengaruh medan listrik. Pergerakan osmosis dalam tanah tersebut biasanya dari anoda menuju katoda, dimana saat migrasi ion efektif akan memisahkan transport anion dan kation yang menuju anoda dan katoda secara berturut-turut.

2.10. HIPOTESIS

Berdasarkan tujuan dan tinjauan pustaka, maka hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Elektrokinetik konfigurasi 2D *hexagonal* dapat digunakan untuk meremediasi tanah terkontaminasi logam berat Cr.
2. Remediasi elektrokinetik dengan konfigurasi elektroda 2D *hexagonal* efisien untuk menurunkan konsentrasi logam berat Cr dalam tanah.

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1. LOKASI PENELITIAN

Lokasi penelitian bertempat di Laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia, JL. Kaliurang km. 14,4 Yogyakarta.

3.2. WAKTU PENELITIAN

Penelitian akan dilaksanakan dalam 2 tahap, yaitu :

1. Tahap pra penelitian : pemilihan tanah, analisis karakteristik dan jenis tanah, persiapan kontaminan, persiapan elektroda dan *power supply* yang dilaksanakan mulai tanggal 19 April 2004.
2. Tahap penelitian dilaksanakan mulai 26 Juli 2004.

3.3. METODE PENGUMPULAN DATA

Untuk mendukung pelaksanaan penelitian ini maka data yang dibutuhkan diperoleh dari :

1. Studi Pustaka (*library research*)

Yaitu metode pengumpulan data melalui berbagai sumber baik dari buku-buku, media cetak maupun elektronik dan juga internet yang berkaitan dengan remediasi tanah secara elektrokinetik.

2. Penelitian Lapangan (*field research*)

Yaitu metode pengumpulan data melalui pengujian sampel yang meliputi :

- a. Analisis karakteristik tanah.
- b. Analisis terhadap konsentrasi logam berat Cr, *resitivity* dan pH.

3.4. METODE EKSPERIMEN

Metode eksperimen terdiri dari tahapan-tahapan sebagai berikut :

3.4.1. Tahap Pra Penelitian

Meliputi penentuan dan pelaksanaan :

I. Persiapan Alat dan Bahan

1. Alat yang digunakan :

- a. Wadah tanah dari kaca
- b. Timbangan/neraca
- c. *Spray*/semprotan
- d. Pengaduk
- e. *Power supply*
- f. Kabel
- g. Elektroda karbon
- h. Ohmmeter
- i. pHmeter

j. Multitester

k. Metode APN (Analisis Pengaktifan Neutron)

2. Bahan yang digunakan :

a. Tanah lempung kaolinit dari Godean Yogyakarta

b. Kontaminan logam berat berupa cairan yaitu Cr_2O_3

c. Aquades

II. Perencanaan

Meliputi penentuan dan pelaksanaan :

1. Pemilihan tanah

Digunakan tanah lempung dari Godean.

2. Persiapan wadah tanah

Wadah dibuat dari bahan kaca berukuran 100 cm x 95 cm x 70 cm dengan tebal kaca 1 cm

3. Persiapan kontaminan logam berat

Menggunakan kontaminan logam berat berupa cairan.

4. Persiapan elektroda

Menggunakan elektroda dari bahan karbon berbentuk silinder. Seluruh permukaan elektroda ditancapkan ke dalam sampel tanah secara vertikal dengan jarak antar elektroda 15 cm dengan menggunakan konfigurasi *hexagonal 2D*.

5. Persiapan *Power Supply*

Menggunakan *power supply* maksimum 60 volt dan 30 A DC, kabel *power supply* dihubungkan ke konektor pada elektroda.

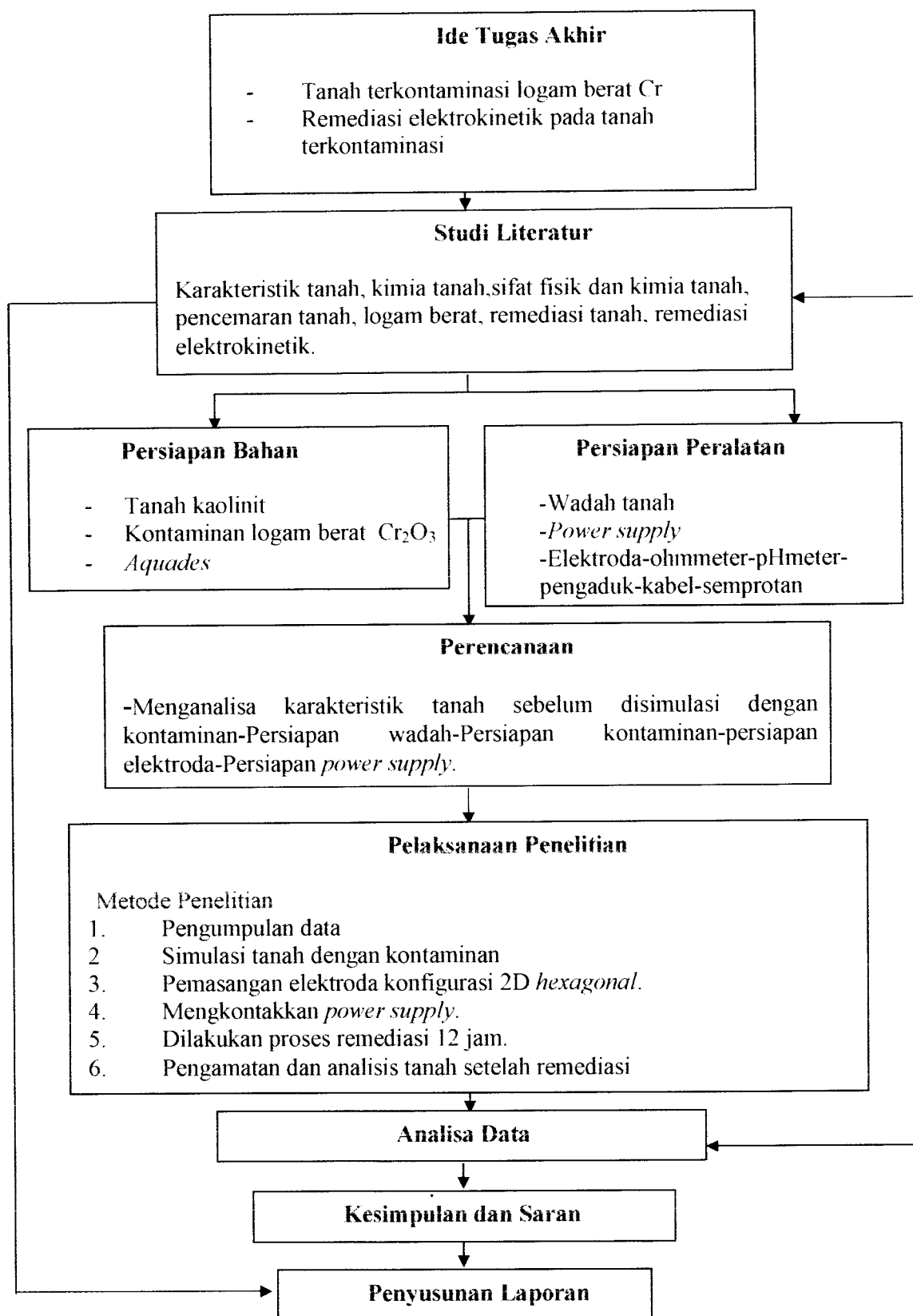
3.4.2. Tahap Penelitian

Langkah-langkah penelitian meliputi :

1. Tanah lempung yang telah dianalisis, dikontaminasikan dengan kontaminan logam berat Cr.
2. Pemasangan elektroda pada masing-masing tanah terkontaminasi dengan konfigurasi *hexagonal*.
3. Mengkontakkan *power supply* dengan sumber arus listrik AC 220 volt agar arus DC maksimum 30 Ampere 60 volt dapat mengalir pada permukaan elektroda dan tanah.
4. Proses dilakukan selama 12 jam.
5. Dilakukan pengamatan pada tiap-tiap sampel dengan rentang waktu setiap 3 jam (untuk pengamatan ini arus listrik dimatikan)
6. Analisa tanah dengan pengamatan terhadap kandungan konsentrasi kontaminan logam berat, resistensi, pH pada tanah setelah proses.

Secara lebih sederhana, alur pikir penelitian ini dapat dilihat pada

Gambar 3.1 berikut ini :



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.4.3. Tahap Analisa

Analisa data yang digunakan untuk membuktikan kebenaran hipotesis yaitu :

I. Pembuktian Hipotesis 1

Menghitung efisiensi penurunan kadar kontaminan Cr setelah dilakukan remediasi tanah secara elektrokinetik. Untuk menghitung efisiensi tersebut digunakan persamaan sebagai berikut : (Metcalf *and* Eddy, 1999)

$$E = \frac{C_{AWAL} - C_{AKHIR}}{C_{AWAL}} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

E = Efisiensi (%)

C = Konsentrasi

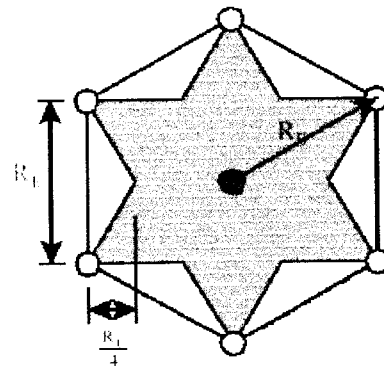
II. Pembuktian Hipotesis 2

Melakukan analisis dengan menggunakan metode yang akan disesuaikan dengan hasil penelitian.

3.5. DESAIN

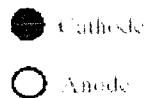
3.5.1. Kebutuhan Elektroda

Konfigurasi elektroda *hexagonal* terdiri dari beberapa sel, masing masing berisi satu katoda yang dikelilingi oleh 6 kutub positif (anoda), seperti pada **Gambar 3.2**.



$$\text{Area of Cell} = \frac{\sqrt{3}R_1}{2}$$

$$\text{Ineffective Area} = \frac{3R_2}{4}$$



Gambar 3.2. Konfigurasi elektroda *hexagonal*
Sumber : Alshawabkeh, 1999

Kebutuhan elektroda maksimum untuk konfigurasi 2D dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$N = \left[\frac{F_1}{\pi Re^2} \right] \dots \dots \dots (2)$$

Dimana,

N = banyaknya elektroda per satuan permukaan (L^{-2})

Re = jarak anoda-katoda (L)

F1 = faktor bentuk yang tergantung pada bentuk konfigurasi,

tidak berdimensi, tertera pada **Tabel 3.1.**

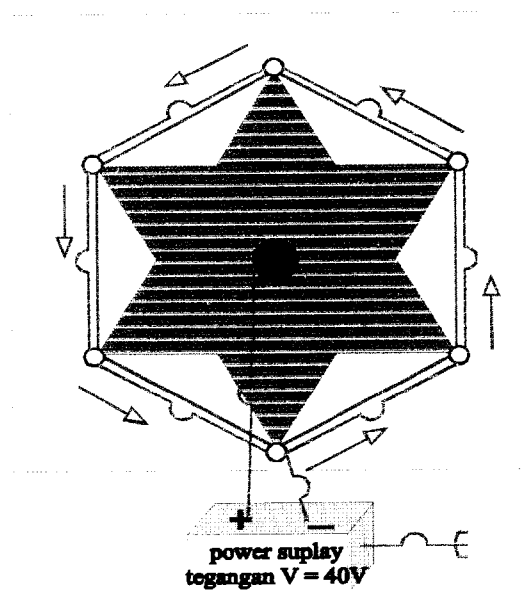
(Alshawabkeh, 1999)

Tabel 3.1. Perbandingan Kebutuhan Elektroda Tiap-tiap Konfigurasi

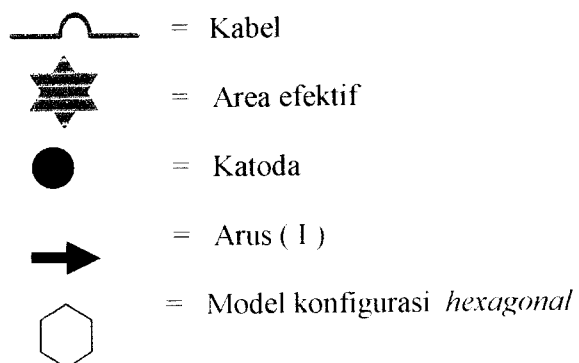
Config.	Electrode spacing		No. of Electrodes per cell (E_1)	Area of cell (A_{cell})	No. of electrodes per unit area		Ineffective Area	
	Opp. Charge	Same charge			N	% increase	A_{ineff}	% of A_{cell}
1-D	l_E	l_E	1	l_E^2	$1/l_E^2$	0	$l_E^2/2$	50%
1-D	l_E	$l_E/2$	2	l_E^2	$2/l_E^2$	100%	$l_E^2/4$	25%
1-D	l_E	$l_E/3$	3	l_E^2	$3/l_E^2$	200%	$l_E^2/6$	17%
Square	R_E	$\sqrt{2} R_E$	2	$2 R_E^2$	$1/R_E^2$	0	R_E^2	50%
Hex.	R_E	R_E	3	$3(\sqrt{3})R_E^2/2$	$\sqrt{(4/3)}/R_E^2$	15.5%	$3R_E^2/4$	29%

Dari persamaan di atas, maka pada penelitian ini diperkirakan untuk konfigurasi elektroda *hexagonal* dengan jumlah elektroda 7, jarak maksimum antar elektroda adalah 30 cm.

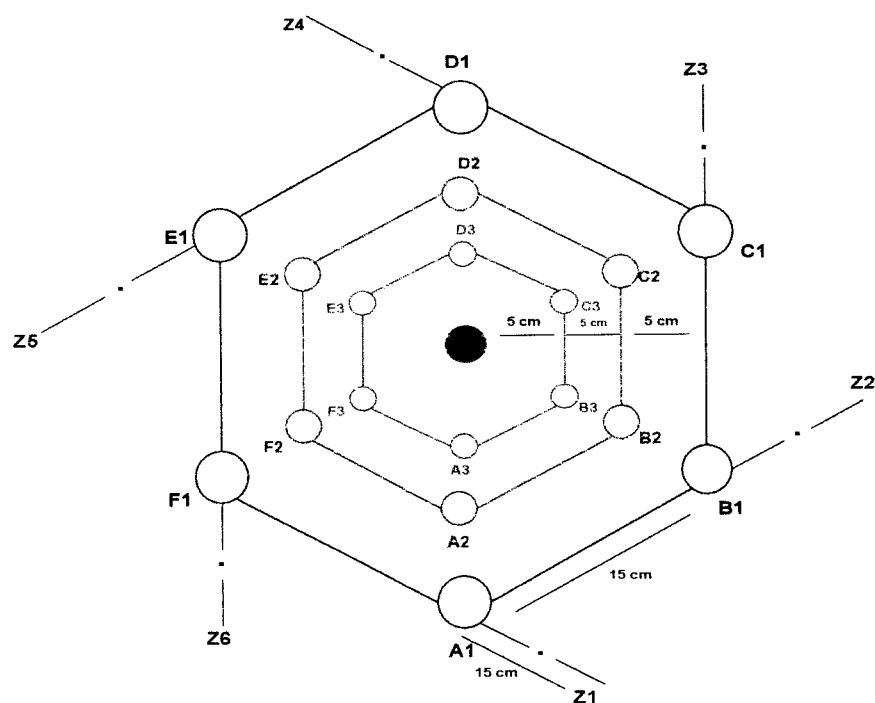
3.5.2. Desain Reaktor

**Gambar 3.3.** Desain Reaktor

Keterangan **Gambar 3.3 :**

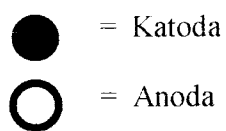


3.5.3. Desain Titik Sampling

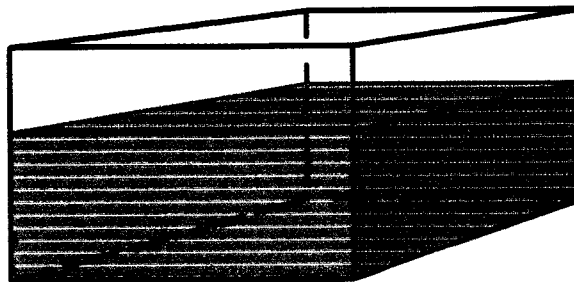


Gambar 3.4. Desain Titik Sampling

Keterangan :



3.5.4. Desain Wadah dan Berat Tanah



Gambar 3.5. Desain Wadah

$$\begin{aligned}\text{Volume tanah} &= p \times l \times t \\ &= 1 \text{ m} \times 0,95 \text{ m} \times 0,13 \text{ m} \\ &= 0,12 \text{ m}^3 = 120 \text{ l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat tanah} &= B_j \text{ tanah} \times \text{volume tanah} \\ &= 1,25 \text{ kg/l} \times 120 \text{ l} \\ &= 150 \text{ kg}\end{aligned}$$

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Media yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah lempung kaolinit dari Godean dengan konsentrasi Cr awal sebelum remediasi 8,3 $\mu\text{g/g}$ (ppm) dan pH awal 5,8 cenderung memiliki kondisi asam, yang kemudian disimulasi dengan Cr_2O_3 (kromium trioksida) sampai konsentrasi 500 $\mu\text{g/g}$ (**Lampiran 1**).

4.1. HASIL ANALISIS pH pada AREA EFEKTIF

Pada penelitian ini, titik sampel tanah dibagi menjadi 4 area yaitu :

- 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 Inefektif : terletak 15 cm diluar anoda

Area I, II dan III merupakan area efektif sedangkan area in efektif merupakan area yang berada di luar daerah elektroda, lihat **Gambar 3.4**.

Penelitian remediasi elektrokinetik dengan model konfigurasi elektroda 2D *hexagonal* ini menggunakan tegangan listrik 40 V dan arus DC pada potongan melintang area antara elektroda pada tanah lempung kolinit Godean yang dikontaminasikan Cr_2O_3 . Penelitian dilakukan selama 12 jam dengan interval waktu 3 jam di tiap area untuk melakukan

pengukuran dan pengambilan sampel tanah, seperti pada tabel-tabel berikut ini :

Tabel 4.1. Hasil Pengukuran pH dalam Area Anoda (I)

Waktu ke- (jam)	Area Anoda	pH	pH rata-rata
0	A1	2,6	2,6
3	A1	2,8	3,0
	F1	3,2	
6	B1	3,8	3,7
	E1	3,6	
9	C1	4,0	3,9
	D1	3,8	
12	A1	4,1	4,2
	F1	3,8	
	E1	4,8	

Tabel 4.2. Hasil Pengukuran pH dalam Area Katoda (III)

Waktu ke- (jam)	Area Katoda	pH	pH rata-rata
0	A	2,6	2,6
3	A	8,1	8,4
	F	8,7	
6	B	9,5	9,2
	E	8,9	
9	C	10,2	10,1
	D	10,0	
12	A	9,5	10,2
	F	10,0	
	E	11,2	

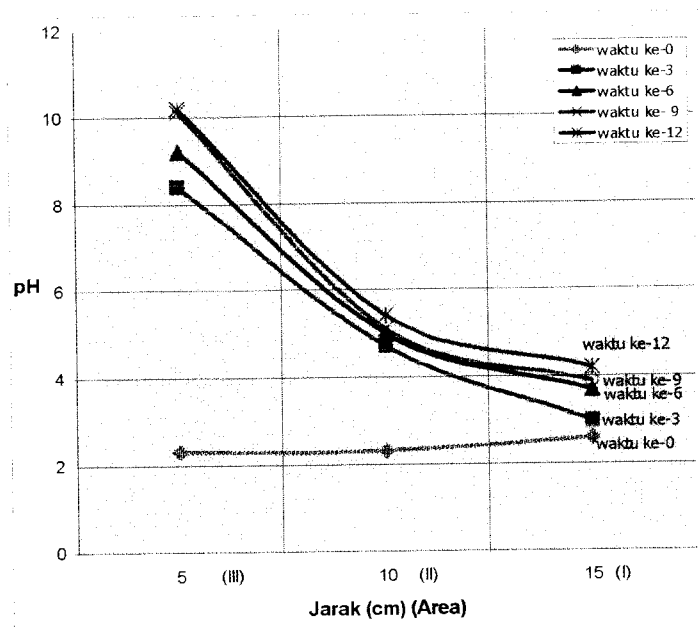
Selain pada area anoda dan katoda, pengukuran pH dilakukan pula diantara anoda dan katoda yaitu area yang letaknya 10 cm dari anoda dan katoda, disebut sebagai area II.

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran pH dalam Area II

Waktu ke- (jam)	Area II	pH	pH rata-rata
0	A2	2,3	2,3
3	A2	4,5	4,65
	F2	4,8	
6	B2	5,0	5,0
	E2	5,0	
9	C2	5,2	5,1
	D2	5,0	
12	A2	5,8	5,4
	F2	4,9	
	E2	5,5	

Dari hasil pengukuran pH tersebut di dapat grafik hubungan antara waktu, jarak (area) dan pH seperti pada **Gambar 4.1**. Dari grafik-grafik tersebut terlihat bahwa terjadi peningkatan pH di setiap area. Pada waktu jam ke-0 di setiap area memiliki pH terendah dengan nilai rata-rata 2, kemudian pada waktu jam ke-3 pH di area I dan area II mengalami kenaikan namun di area III atau area sekitar katoda kenaikan pH sangat tajam, yaitu mencapai 8,4. Pada waktu jam ke-6 pH di area I dan area II masing-masing sebesar 3,7 dan 5,0. Sedangkan pH di area III semakin meningkat sebesar 9,2 sampai pada waktu jam ke-12, pH maksimum di

area III sebesar 10,2 dan di area I dan II yaitu masing-masing sebesar 4,2 dan 5,4 (Lampiran 2).

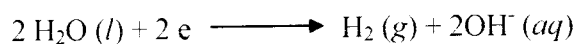


Gambar 4.1. Grafik Hubungan pH terhadap Jarak (Area)

Dari perubahan pH tersebut dapat diartikan bahwa telah terjadi reaksi-reaksi kimia di setiap area titik sampling. Salah satunya telah terjadi proses *electrolysis*, yaitu reaksi oksidasi air pada kutub positif (anoda) disebut sebagai area I yang menghasilkan kondisi asam, sementara pada kutub negatif (katoda) disebut sebagai area III terjadi reduksi air yang menghasilkan kondisi basa. Reaksi-reaksi yang terjadi tersebut yaitu :

a. Pada Area Katoda (III)

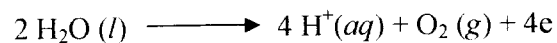
Reduksi air :



Reaksi di atas menjelaskan terjadi reduksi air pada area III (katoda) yaitu pengambilan elektron sebanyak $2e$ yang kemudian menghasilkan ion OH^- sehingga berarti bahwa pada area III (katoda) mengalami kondisi basa.

b. Pada Area Anoda (I)

Oksidasi air :

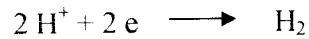


Reaksi di atas menjelaskan reaksi oksidasi air pada area anoda (I) dimana terjadi pelepasan elektron sebanyak $4e$ dan menghasilkan ion H^+ yang berarti bahwa pada area I mengalami kondisi asam (Setiono,1990).

Ion-ion dari zat terlarut dan ion-ion hidrogen maupun hidroksil (OH^-), berlomba-lomba untuk melepaskan muatan mereka pada elektroda dan ion yang berhasil adalah ion yang memerlukan energi paling sedikit untuk melepaskan muatan. Dengan memakai istilah elektrokimia, dapat dikatakan bahwa pada keadaan tertentu, ion yang memerlukan tegangan elektroda negatif yang lebih rendah akan terlebih dulu melepaskan muatannya pada katoda, sedangkan ion-ion yang memerlukan tegangan elektroda positif yang lebih rendah, akan terlebih dulu melepaskan muatannya pada anoda. Pelepasan ion-ion hidroksil pada anoda mengakibatkan terbentuknya gas oksigen :



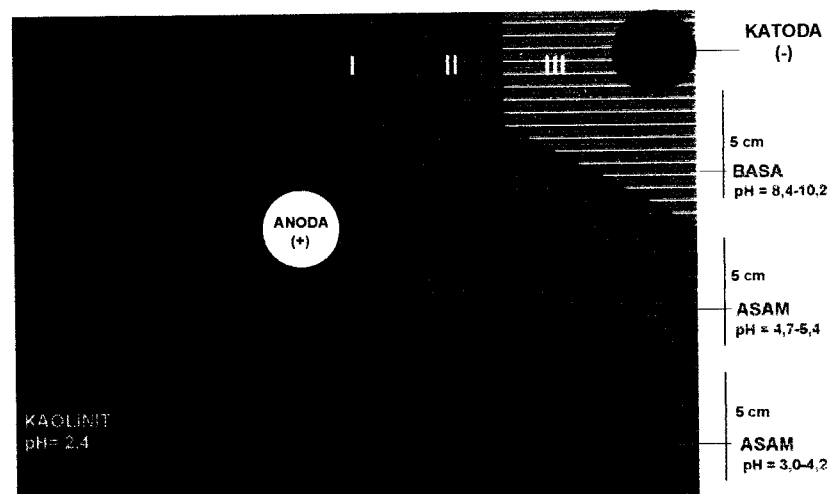
Sedangkan reaksi yang terjadi pada katoda adalah bahwa ion-ion hidrogen bermigrasi ke arah katoda dengan membentuk molekul-molekul hidrogen, yang dilepaskan dalam bentuk gas hidrogen : (Setiono,1990)



Pada area II yaitu area di antara anoda dan katoda pada penelitian ini mengalami kondisi asam namun memiliki nilai pH yang lebih tinggi dibanding dengan area I. Area II memiliki pH rata-rata 5, sehingga dimungkinkan di area II tersebut lebih dominan terpengaruh oleh area anoda sehingga pada area II cenderung mengalami kondisi asam.

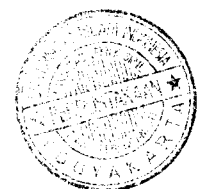
Daya hantar larutan pada proses *electrolysis* ini disebabkan karena adanya ion-ion (partikel bermuatan) yang apabila dialirkan listrik akan bermigrasi ke arah elektroda yang muatannya berlawanan, karena gaya elektrostatik.

Untuk lebih jelasnya perbedaan area asam dan basa di setiap titik sampling dapat dilihat pada **Gambar 4.2** berikut ini :



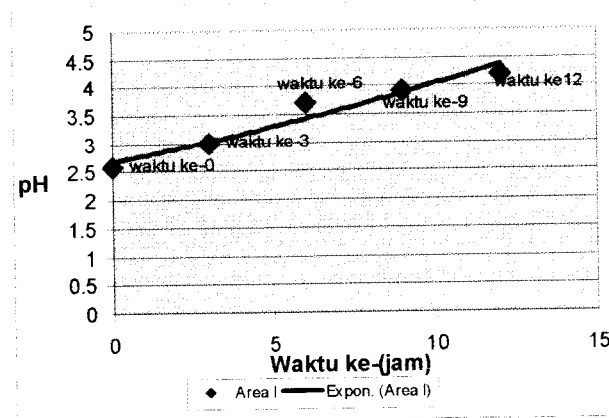
Gambar 4.2. Perbedaan asam dan basa pada potongan area titik sampling

Tidak hanya area elektroda (anoda dan katoda) saja yang berpengaruh terhadap perubahan pH, faktor waktu juga berpengaruh terhadap kenaikan pH. Berikut ini grafik-grafik hubungan pH terhadap

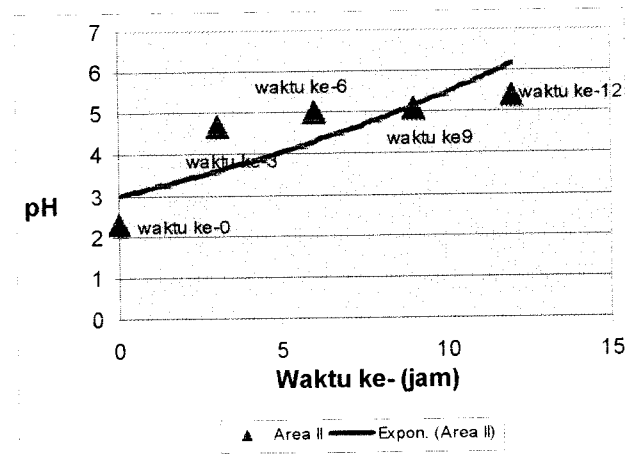


waktu di tiap-tiap area efektif, yang disesuaikan dengan data dari Tabel

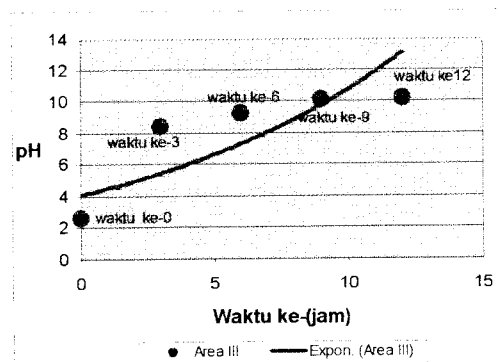
4.1 sampai Tabel 4.3 :



Gambar 4.3. Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area I

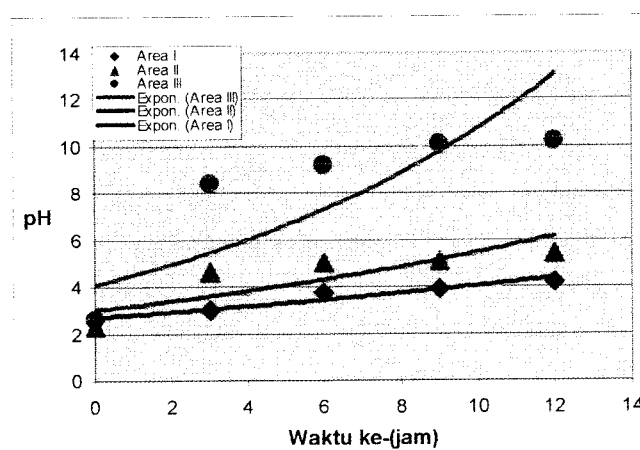


Gambar 4.4. Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area II



Gambar 4.5. Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area III

Fenomena atau *trend* yang terjadi dari hubungan pH terhadap waktu **Gambar 4.3** sampai **Gambar 4.5** ditunjukkan pada garis *exponensial* di masing-masing area. Perbedaan posisi antara garis *exponensial* dengan sebaran data pada setiap grafik di atas kemungkinan diakibatkan adanya kesalahan pengukuran pH, kadar air yang tidak homogen sehingga proses *electrolysis* tidak merata atau faktor lainnya. Dari **Gambar 4.3** sampai **Gambar 4.6**, dapat dilihat fenomena dan hubungan pH terhadap waktu di area efektif seperti pada gambar berikut :



Gambar 4.6. Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area Efektif

Dari **Gambar 4.6** terlihat bahwa pada masing-masing area mengalami kenaikan pH dalam interval waktu 3 jam. Fenomena yang terjadi adalah semakin lama waktu remediasi, maka pH akan mengalami kenaikan.

Alshwabkeh (1999) : Perubahan pH pada tanah terkontaminasi tergantung pada jenis bahan kimia, kadar air dalam tanah, proses *electrolysis*, waktu *treatment* dan potensial elektrokimia. Arus listrik yang mengalir melalui elektroda juga mempengaruhi proses elektrolisis di elektroda.

Oksidasi air di kutub positif (anoda) menghasilkan kondisi asam sementara pada kutub negatif (katoda) terjadi reduksi (pengurangan) yang menghasilkan kondisi basa dalam tanah. Saat asam dihasilkan di kutub positif (anoda), melalui tanah dapat sampai ke arah katoda dibantu oleh migrasi ion dan elektroosmosis, basa yang dihasilkan di katoda dapat bergerak menuju ke anoda dibantu secara difusi dan migrasi ion (Alshwabkeh, 1999).

Dari garis *trend* pada **Gambar 4.6** di atas didapat persamaan-persamaan yaitu pada garis *trend* area I $y = 2,6843^{0,407x}$, area II $y = 3,0015e^{0,06x}$, area III $y = 4,0713e^{0,0973x}$. Pada penelitian ini dapat diketahui pH dan waktu optimum yang dapat dicapai melalui perhitungan pada persamaan garis *trend* di tiap area. Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk mencapai pH maksimum pada area III yaitu sebesar 11 diperlukan waktu remediasi selama 17 jam. Namun dengan

waktu yang sama pada area I dan area II, pH yang dihasilkan menjadi sangat signifikan yaitu nilai pH dibawah 3 sehingga dapat mengakibatkan tanah dalam kondisi B₃ (Bahan Baerbahaya dan Beracun) (**Lampiran 3**).

4.2. HASIL ANALISIS KONSENTRASI Cr pada AREA EFEKTIF

Analisis konsentrasi Cr dalam tanah kaolinit menggunakan metode APN, data-data hasil analisis dapat dilihat pada **Lampiran 6**. Dari data hasil analisis dengan metode APN tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi Cr awal A₀ di setiap area adalah sebesar 509,524 µg/g. Setelah dilakukan remediasi terjadi penurunan konsentrasi Cr yang berbeda di setiap area sampling, dengan interval waktu remediasi masing-masing area adalah tiap 3 jam.

Tabel 4.4 adalah data hasil analisis konsentrasi Cr yang telah disusun berdasar waktu pengambilan sampel pada area efektif. Konsentrasi Cr dalam tanah dari data pada **Tabel 4.4** dapat diklasifikasikan sesuai dengan area titik sampling dan pengulangannya yaitu pada **Tabel 4.5** sampai dengan **Tabel 4.7**

Tabel 4.4. Hasil Analisis Konsentrasi Cr dalam Tanah pada Area Efektif

Waktu ke- (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)
0	Ao	509,524
3	A1	206,551
	F1	217,571
	F2	202,689
	F3	235,182
6	B1	107,081
	E1	94,086
	E2	80,869
	E3	201,843
9	C1	101,122
	D1	88,967
	D2	83,742
	D3	96,566
12	A1,2	94,006
	E1,2	88,211
	E2,2	83,989
	E3,2	85,479
	F1,2	83,742
	F2,2	73,065
	F3,2	92,928

Tabel 4.5. Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area I

Waktu ke- (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)	Konsentrasi Rata- rata ($\mu\text{g/g}$)
0	Ao	509,524	509,524
3	A1	206,551	212,061
	F1	217,571	
6	B1	107,081	100,5835
	E1	94,086	
9	C1	101,122	95,0445
	D1	88,967	
12	A1,2	94,066	88,653
	E1,2	88,211	
	F1,2	83,742	

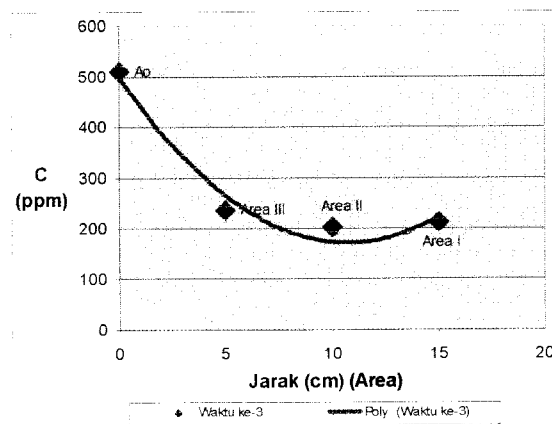
Tabel 4.6. Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area II

Waktu ke- (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)	Konsentrasi Rata- rata ($\mu\text{g/g}$)
0	0	509,524	509,524
3	F2	202,689	202,689
6	E2	80,869	80,869
9	D2	83,742	83,742
12	F2,2	83,989	78,527
	E2,2	73,065	

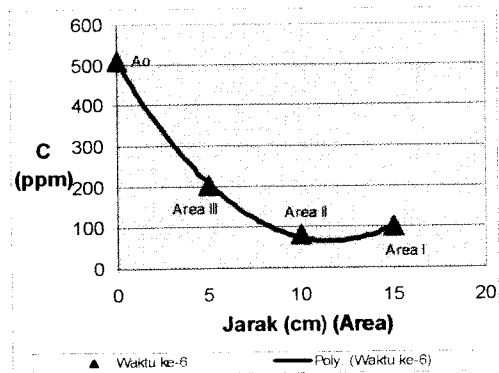
Tabel 4.7. Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area III

Waktu ke- (jam)	Titik Sampling	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)	Konsentrasi Rata-rata ($\mu\text{g/g}$)
0	O	509,542	509,524
3	F3	235,182	235,182
6	E3	201,843	201,843
9	D3	96,566	96,566
12	E3,2	85,479	89,203
	F3,2	92,928	

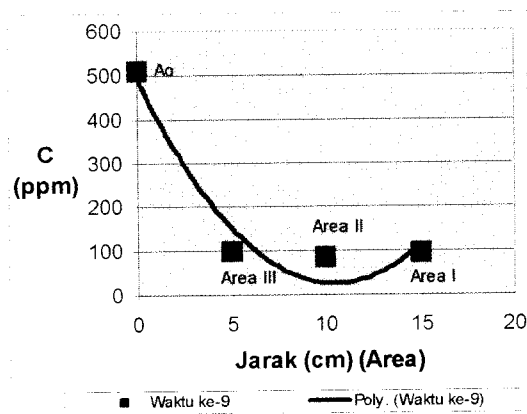
Dari data pada tabel-tabel di atas, dapat dibuat grafik hubungan antara variabel konsentrasi Cr, jarak dan waktu di area efektif seperti pada gambar-gambar berikut ini :



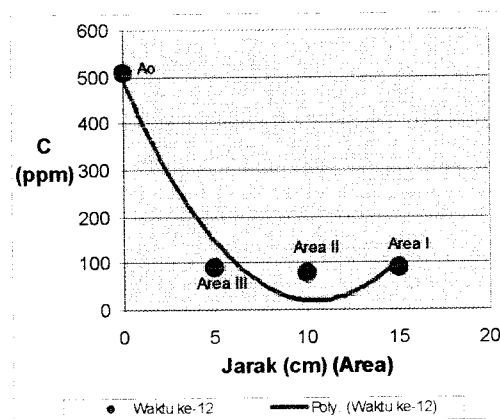
Gambar 4.7. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-3 Jam



Gambar 4.8. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-6 Jam

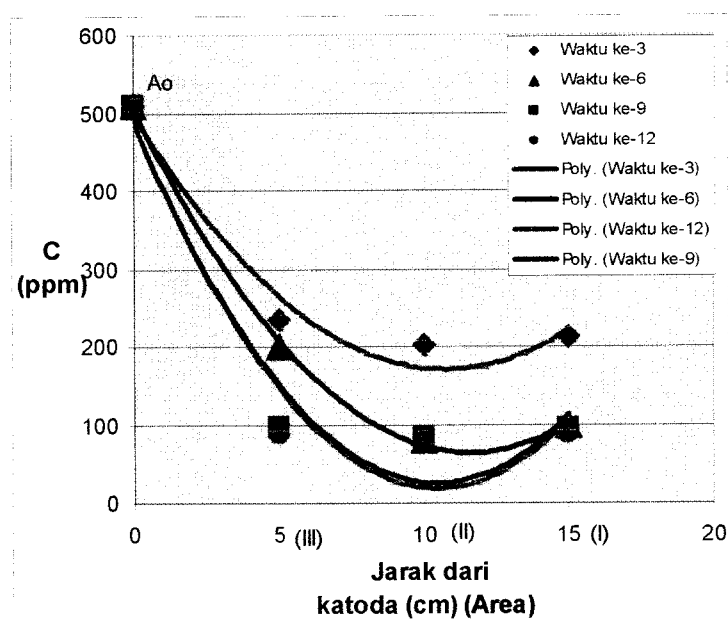


Gambar 4.9. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-9 Jam



Gambar 4.10. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-12 Jam

Grafik pada **Gambar 4.7** sampai **Gambar 4.10** menjelaskan adanya penurunan konsentrasi Cr setiap interval waktu 3 jam di setiap area efektif. Penurunan konsentrasi Cr rata-rata setiap 3 jam pada area I (anoda) mengalami penurunan yang cukup besar dengan konsentrasi Cr terendah saat waktu ke 12 jam yaitu sebesar 88,653 $\mu\text{g/g}$. Penurunan konsentrasi yang sangat tajam terjadi pada area II yaitu sebesar 78,527 $\mu\text{g/g}$. Pada area III terjadi penurunan konsentrasi Cr yang tidak terlalu besar yaitu 89,203 $\mu\text{g/g}$. Dari gambar-gambar tersebut dapat dibuat grafik hubungan konsentrasi Cr terhadap waktu pada area efektif berikut ini :



Gambar 4.11. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Area Efektif

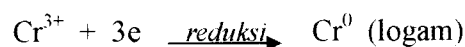
Penurunan konsentrasi pada masing-masing area tersebut karena adanya pergerakan ion-ion Cr^{3+} menuju katoda sehingga dari **Gambar 4.11** dapat dilihat, bahwa dari konsentrasi Cr awal yaitu di titik 509 $\mu\text{g/g}$ setelah mengalami remediasi mengalami penurunan konsentrasi di tiap titik area selama 12 jam.

Garis *polynomial* di setiap area pada **Gambar 4.11** menunjukkan *trend* atau fenomena gerakan ion-ion Cr^{3+} menuju katoda, garis tersebut mencapai titik terendah dialami area II yaitu area dengan jarak 10 cm dari katoda. Migrasi ion Cr^{3+} menuju katoda pada area II tersebut tersebut lebih banyak dibanding area lainnya. Banyaknya jumlah ion Cr^{3+} yang bermigrasi salah satunya ditentukan oleh cepatnya gerakan antar ion Cr^{3+} bermigrasi menuju katoda, sehingga jarak sangat berpengaruh terhadap pergerakan ion-ion Cr^{3+} tersebut. Area III adalah yang berada di sekitar katoda dengan jarak 5 cm dari katoda, dari garis *polynomial* yang terlihat konsentrasi Cr terendah di area III tersebut lebih tinggi dibanding area lainnya, dimungkinkan ion-ion Cr^{3+} yang bermigrasi menuju katoda terakumulasi di area sekitar katoda tersebut, sehingga walaupun terjadi penurunan konsentrasi Cr di area III namun tidak terlalu besar karena terus terjadi penambahan ion Cr^{3+} yang berasal dari area lainnya. Pergerakan ion-ion Cr^{3+} karena adanya aliran listrik sehingga kation tersebut bermigrasi menuju katoda.

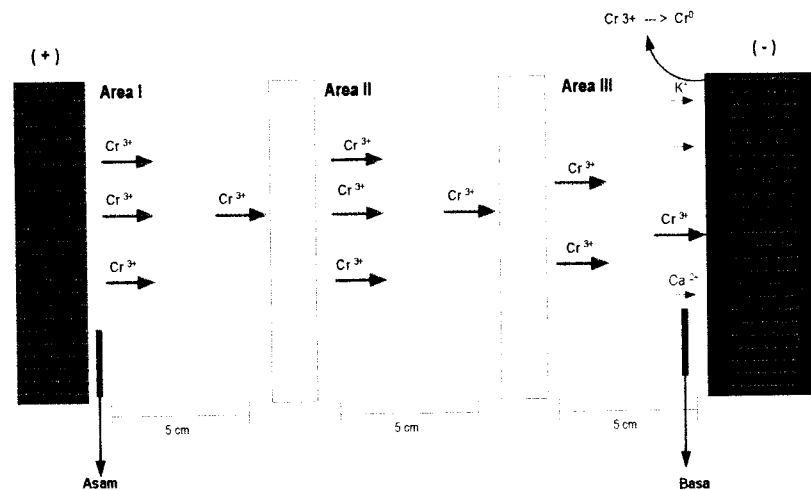
Hal senada juga diungkapkan oleh Alshawabkeh (1999) bahwa adanya penurunan konsentrasi ion-ion karena telah terjadi proses

electromigration atau *ion migration* di bawah pengaruh medan listrik. Arus listrik yang terjadi pada tanah mengakibatkan migrasi ion-ion bermuatan menuju ke arah elektroda kebalikannya. Sebagai hasil dari adanya migrasi ion maka kation-kation dikumpulkan di katoda dan anio-anion di kutub positif (anoda).

Tanah yang mengandung ion Cr^{3+} yang berasal dari kontaminan Cr_2O_3 (kromium trioksida), pada katoda direduksi menjadi logamnya sendiri dan logam yang terbentuk itu kemudian diendapkan dan menempel pada permukaan batang katoda (Petrucci, 1993). Sesuai dengan reaksi berikut ini :



Ion-ion Cr^{3+} pada area I dan area II bergerak menuju katoda di bawah pengaruh medan listrik, sehingga pada area I dan area II tersebut terjadi penurunan konsentrasi Cr. Pada area III (katoda) penurunan konsentrasi yang terjadi tidak terlalu besar dibanding pada area I dan II, ini dikarenakan area III merupakan area terletaknya katoda, sehingga ion-ion Cr^{3+} dari area I dan area II yang bergerak menuju katoda cenderung terakumulasi pada area katoda sedangkan ion-ion tersebut tidak langsung dapat menempel dan mengendap pada katoda yang mengakibatkan pada area III terjadi penambahan konsentrasi Cr yang berasal dari area I dan II. Walaupun demikian pada area III tetap terjadi penurunan konsentrasi Cr, karena ion-ion Cr^{3+} terus bergerak menuju katoda dan menempel pada permukaan batang katoda, seperti dijelaskan pada **Gambar 4.12**.

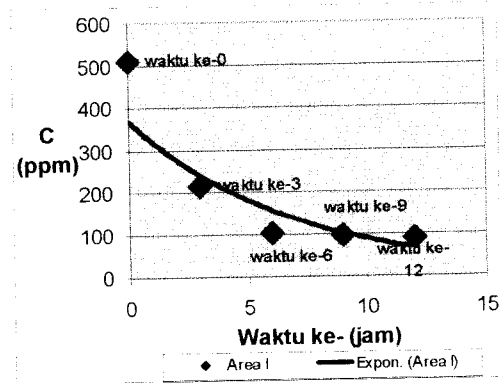


Gambar 4.12. Arah proses elektromigrasi atau migrasi ion pada anoda dan katoda

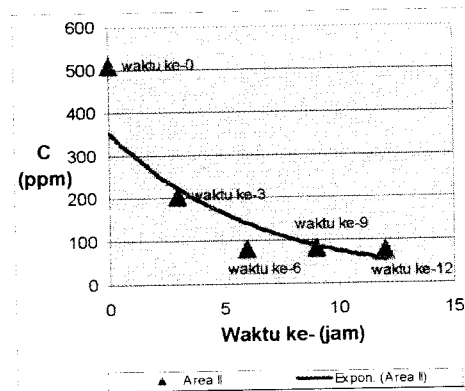
Dari **Gambar 4.12** tersebut terlihat bahwa pada saat terjadi elektromigrasi atau migrasi ion, ion-ion bermuatan positif (kation) akan saling berebutan menuju katoda. Sehingga konsentrasi ion-ion bermuatan positif akan terakumulasi pada area katoda.

Selain hal-hal tersebut di atas, lamanya waktu remediasi juga berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi ion-ion Cr^{3+} . Penurunan konsentrasi ion-ion tersebut diakibatkan adanya pergerakan ion-ion tersebut menuju kutub negatif (katoda) dalam interval waktu 12 jam. Dari data yang didapat pada penelitian ini mengindikasikan bahwa semakin lama waktu remediasi, maka konsentrasi ion-ion Cr^{3+} semakin menurun. Seperti yang dikatakan oleh Pamukcu (1994), bahwa penurunan ion-ion tergantung pada biaya, spasi elektroda, konfigurasi elektroda, waktu *treatment* dan reaksi-reaksi geokimia. Grafik-grafik berikut ini

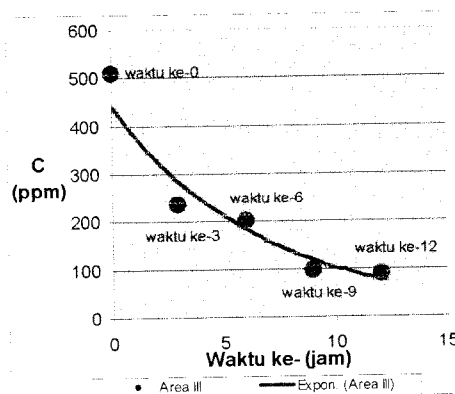
menunjukkan fenomena (*trend*) yang terjadi dalam hubungan konsentrasi Cr terhadap waktu remediasi pada masing-masing area efektif :



Gambar 4.13. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area I

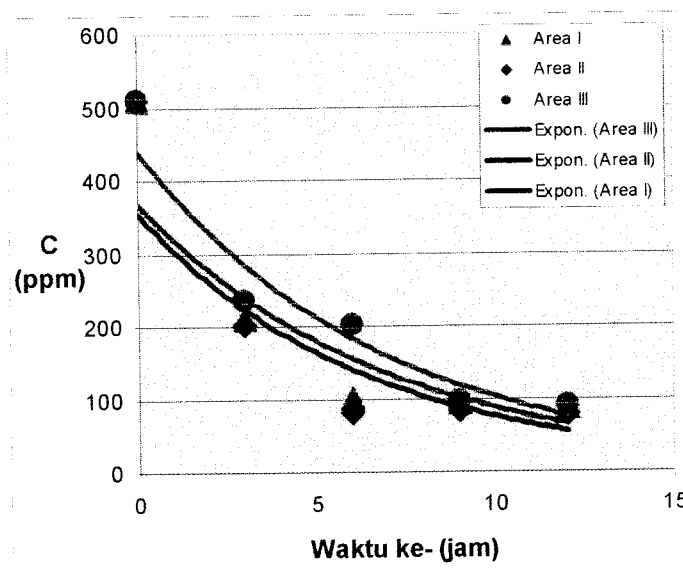


Gambar 4.14. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area II



Gambar 4.15. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area III

Dari **Gambar 4.13** sampai **Gambar 4.15** tersebut dapat dilihat bahwa terjadi penurunan konsentrasi Cr di setiap area dalam interval waktu 3 jam selama proses remediasi 12 jam. Garis-garis *exponensial* pada grafik-grafik tersebut menunjukkan fenomena yang terjadi pada hubungan konsentrasi terhadap waktu. Semakin lama waktu remediasi, konsentrasi Cr dalam tanah semakin menurun sampai pada saat dimana ion-ion tidak dapat bermigrasi lagi. Fenomena pada hubungan konsentrasi dan waktu remediasi di seluruh area efektif dapat dilihat pada grafik berikut ini :



Gambar 4.16. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area Efektif

Dari garis *trend* (fenomena) di atas dapat dilihat bahwa semakin lama waktu remediasi maka konsentrasi Cr semakin menurun. Konsentrasi Cr terendah berada pada area II yaitu sebesar 78,52 $\mu\text{g/g}$ dengan waktu remediasi selama 12 jam.

Garis *trend* pada **Gambar 4.16** menghasilkan persamaan-persamaan yaitu pada area I $y = 368e^{-0.1433x}$, area II $y = 354e^{-0.154x}$, area III $y = 440e^{-0.1458x}$. Dari perhitungan yang dilakukan, penelitian dengan waktu 17 jam yaitu waktu pada saat pH maksimum, didapat konsentrasi Cr yang semakin menurun, namun dengan konsentrasi yang semakin menurun tersebut terjadi kondisi pH tanah yang semakin bersifat B₃, sehingga dapat dikatakan bahwa waktu 12 jam pada penelitian ini cukup optimum (**Lampiran 4**).

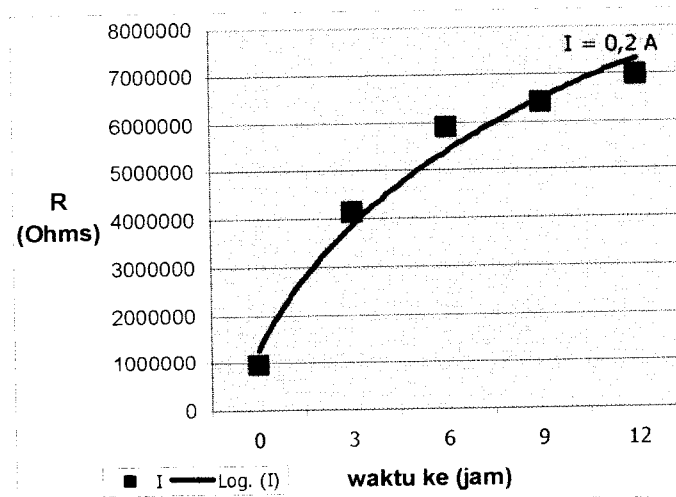
4.3. HASIL ANALISIS pada ARUS dan RESISTENSI

Pengukuran dilakukan pada arus dan resistensi dengan interval waktu tiap 3 jam. Data hasil pengukuran tersebut dapat dilihat padaa Tabel 4.8 di bawah ini :

Tabel 4.8. Hasil Pengukuran pada Arus dan Resistensi

Waktu ke- (jam)	Resistensi (kΩ)	Arus (Ampere)
0	96	0
3	412	0,2
6	588	0,2
9	640	0,2
12	695	0,2

Dari data pada **Tabel 4.8** di dapat grafik hubungan antara waktu dan resistensi seperti pda **Gambar 4.17** berikut :



Gambar 4.17. Grafik Hubungan Resistensi, Waktu dan Arus

Grafik pada **Gambar 4.17** menunjukkan bahwa terjadi peningkatan resistensi pada variasi waktu setiap 3 jam sedangkan arus yang terjadi mengalami nilai konstan yaitu 0,2 A (**Lampiran 5**). Karena berkurangnya jumlah ion-ion penghantar maka hambatan (resistensi) yang terjadi dalam tanah semakin meningkat. Selain itu, karena adanya penumpukan kation pada katoda mengakibatkan luas penampang katoda menjadi kecil sehingga hambatan yang dialami arus listrik akan semakin besar, teori tersebut sesuai dengan persamaan bahwa resistensi akan berbanding terbalik dengan luas penampang (Bueche,1989). Maka kenaikan resistensi yang terjadi pada penelitian ini disebabkan karena adanya penurunan konsentrasi ion-ion logam muatan positif sehingga menyebabkan kenaikan resistensi yang cukup signifikan.

4.4. HUBUNGAN KONSENTRASI, pH dan Waktu di AREA EFEKTIF

Dimungkinkan variabel konsentrasi Cr, pH dan waktu memiliki hubungan yang saling ketergantungan satu sama lain, berikut ini tabel dan grafik hubungan antara variabel tersebut pada masing-masing area :

Tabel 4.9. Hubungan Konsentrasi Cr dan pH pada Area I

Waktu ke- (jam)	Konsentrasi Cr	pH rata-rata
0	509,524	2,6
3	212,061	3,0
6	100,583	3,7
9	95,044	3,9
12	88,653	4,2

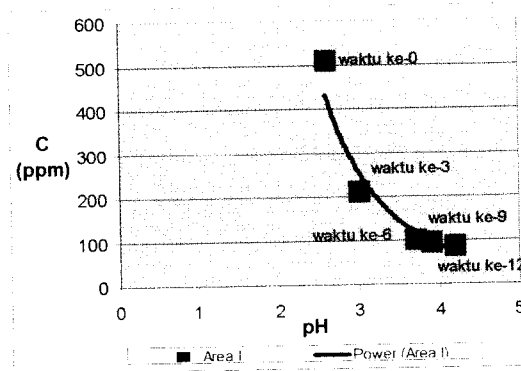
Tabel 4.10. Hubungan Konsentrasi Cr dan pH pada Area II

Waktu ke- (jam)	Konsentrasi Cr ($\mu\text{g/g}$)	pH rata-rata
0	509,524	2,3
3	202,689	4,65
6	80,869	5,0
9	83,742	5,1
12	78,527	5,4

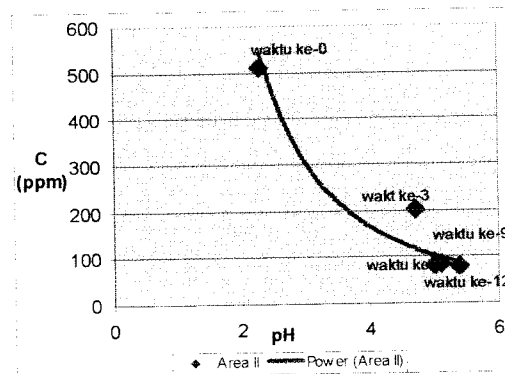
Tabel 4.11. Hubungan Konsentrasi Cr dan pH pada Area III

Waktu ke- (jam)	Konsentrasi Cr ($\mu\text{g/g}$)	pH rata-rata
0	509,524	2,3
3	235,182	8,4
6	201,843	9,2
9	96,566	10,1
12	89,2035	10,2

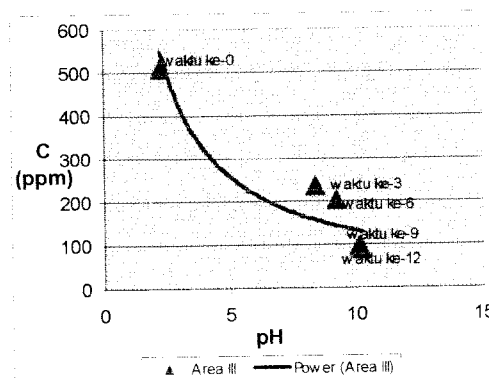
Dari Tabel 4.9 sampai Tabel 4.11 tersebut dapat dibuat grafik hubungan antar konsentrasi Cr dan pH pada tiap-tiap area efektif :



Gambar 4.18. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area I



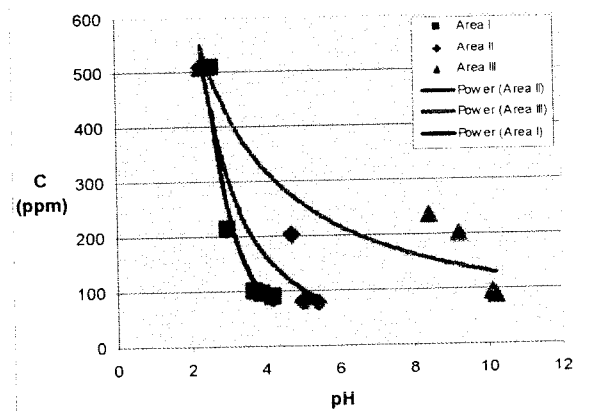
Gambar 4.19. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area II



Gambar 4.20. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area III

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa penurunan konsentrasi Cr terjadi bersamaan dengan perubahan pH di setiap area efektif dalam interval tiap 3 jam. Namun penurunan konsentrasi terendah terjadi pada area II, area yang terletak di antara katoda dan anoda yaitu sebesar 78,54 $\mu\text{g/g}$. Sedangkan area yang memiliki konsentrasi Cr paling tinggi adalah pada area III yaitu area yang berada di sekitar katoda, konsentrasi Cr terendah pada area tersebut sebesar 89,2035 $\mu\text{g/g}$. Pada area di sekitar anoda (area I) mengalami kondisi asam dimana pH tertinggi yaitu sebesar 4,2. Area di sekitar katoda (area III) mengalami kondisi basa dengan pH tertinggi sebesar 10,2. Sedangkan area di antara katoda dan anoda (area II) memiliki pH tertinggi sebesar 5,4 yang berarti pada area II mengalami kondisi asam.

Dari gambar-gambar di atas menunjukkan adanya reaksi-reaksi kimia akibat pengaruh medan listrik. Perubahan pH menunjukkan telah terjadinya proses *electrolysis* dan *electromigration*. Konsentrasi Cr yang menurun sebagai akibat dari adanya migrasi ion dan *electrophoresis*. Berikut ini grafik hubungan konsentrasi Cr terhadap pH di seluruh area efektif :



Gambar 4.21. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area Efektif

Garis *power* di setiap area menunjukkan *trend* atau fenomena yang terjadi pada area tersebut. Sehingga kenaikan dan penurunan konsentrasi yang tidak stabil dari sebaran data dimungkinkan karena adanya kesalahan pengambilan sampel, tidak homogenya tanah atau sebab lainnya. Penurunan konsentrasi Cr yang terjadi di setiap area diiringi dengan perubahan nilai pH. Perubahan-perubahan konsentrasi Cr dan pH tersebut mencapai titik minimum dan maksimum saat waktu ke 12 jam.

Penurunan konsentrasi dan perubahan pH yang terjadi disebabkan karena terjadinya reaksi-reaksi kimia di bawah pengaruh medan listrik.

4.5. HASIL ANALISIS KONSENTRASI Cr pada AREA INEFEKTIF

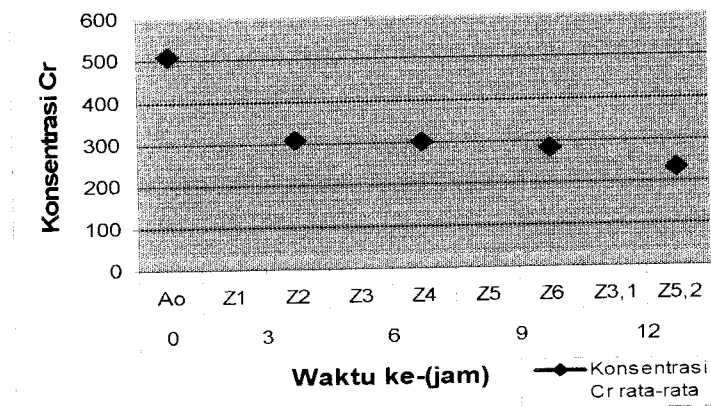
Selain pada area efektif, analisis konsentrasi Cr dilakukan juga pada area inefektif, area yang terletak di luar area efektif. Pengambilan sampel dan data pada area inefektif (Z) ini adalah sebagai perbandingan dengan area efektif. Area inefektif merupakan area yang berada di luar daerah elektroda (anoda dan katoda). Pada penelitian ini, pengambilan

sampel tanah yang telah diremediasi dilakukan pada waktu yang bersamaan dengan pengambilan sampel tanah pada area inefektif. Jarak pengambilan sampel tanah pada area inefektif sejauh 15 cm ke arah luar elektroda yaitu 15 cm dari arah anoda. **Tabel 4.12** adalah hasil analisis pada area inefektif yang disesuaikan dengan waktu pengambilan sampel. Dari data pada tabel tersebut didapat bahwa terjadi penurunan konsentrasi Cr pada area inefektif, sehingga dapat dimungkinkan bahwa pada area tersebut mendapat pengaruh dari medan listrik area efektif. Fenomena yang terjadi pada area inefektif dapat dilihat pada **Gambar 4.22**. Penurunan konsentrasi Cr pada area inefektif tidak sebesar penurunan konsentrasi Cr pada area efektif, walaupun sangat kecil telah terjadi pengaruh sistem elektroda area efektif terhadap area inefektif .

Tabel 4.12. Hasil Analisis Konsentrasi Cr pada Area Inefektif

Waktu ke - (jam)	Kode Sampel	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)	Konsentrasi Cr rata-rata ($\mu\text{g/g}$)
0	Ao	509,524	509,524
3	Z1	385,572	308,508
	Z2	231,438	
6	Z3	322,782	299,568
	Z4	276,353	
9	Z5	274,620	283,025
	Z6	291,430	
12	Z3,1	207,821	233,780
	Z5,2	259,738	

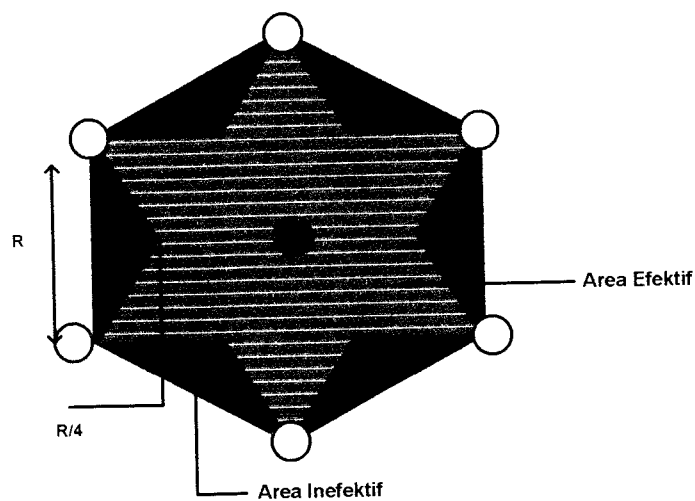
Dari data **Tabel 4.12** dapat dibuat grafik seperti **Gambar 4.22** di bawah ini :



Gambar 4.22. Grafik Konsentrasi Cr terhadap Waktu pada Area Inefektif

Grafik pada **Gambar 4.22** menunjukkan adanya penurunan konsentrasi Cr pada setiap interval waktu dengan konsentrasi minimum yaitu 233,780 $\mu\text{g/g}$. Konsentrasi Cr rata-rata pada area inefektif yaitu sebesar 281,2203 $\mu\text{g/g}$.

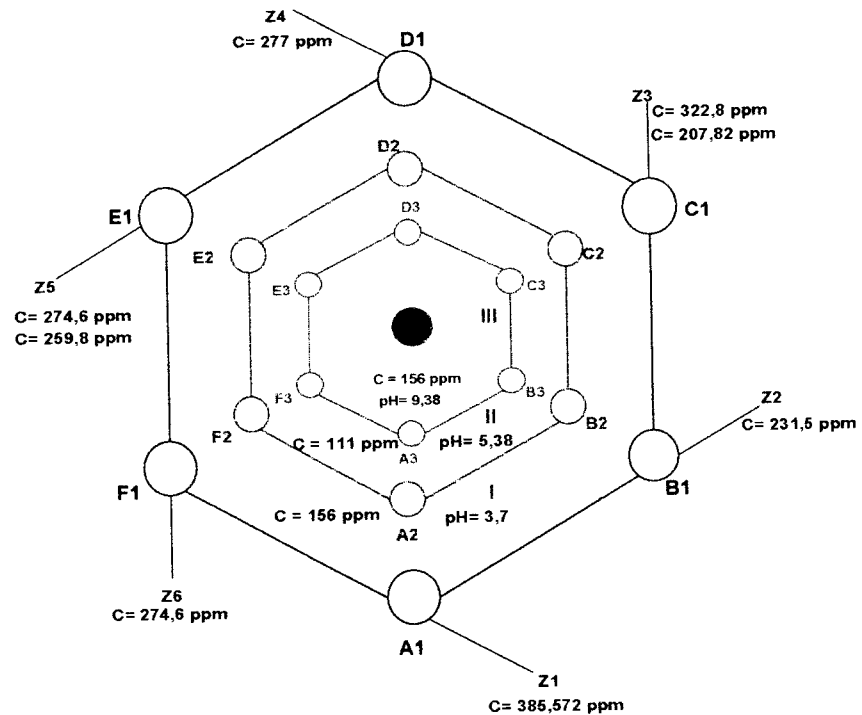
Menurut Alshwabkeh (1999), distribusi medan listrik menunjukkan area inefektif beberapa sel berbentuk *curvilinear triangle* (segitiga sama kaki) dengan badan kaki merupakan jarak elektroda yang mempunyai polaritas sama. Tinggi area segitiga ini diperkirakan tergantung pada waktu proses, spasi elektroda dan kesejajaran, seperti pada **Gambar 4.23**.



Gambar 4.23. Bentuk Area Efektif dan Inefektif karena Distribusi Medan Listrik (Alshawabkeh, 1999).

Secara umum, tujuan penerapan konfigurasi elektroda 2D adalah untuk mencapai aliran radial (*axi-symmetrical*). Katoda ditempatkan di tengah untuk memberikan akumulasi kontaminan Cr 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 (Alshawabkeh, 1999).

Pada **Gambar 4.24** berikut ini dijelaskan konsentrasi Cr dan pH rata-rata pada seluruh titik sampling. Jarak untuk tiap titik sampling dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.



Gambar 4.24. Konsentrasi Cr dan pH Rata-rata pada setiap Titik Sampling

4.6. HASIL ANALISIS KONSENTRASI Cr pada TANAH yang TIDAK DIREMEDIASI

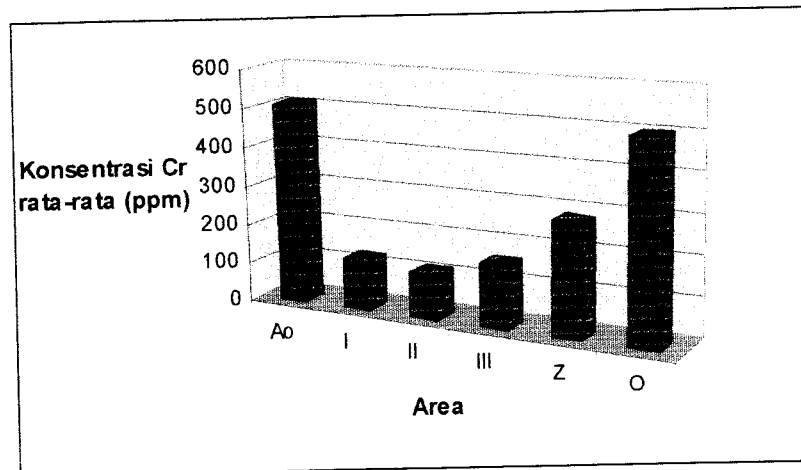
Pada penelitian ini, di analisis juga sampel tanah terkontaminasi logam berat Cr yang tidak di remediasi. Sehingga tanah terkontaminasi tersebut dibiarkan pada udara terbuka. Hasil analisis dengan metode APN menyatakan bahwa sampel tanah tersebut (O) mempunyai konsentrasi sebesar 497,324 $\mu\text{g/g}$ (**Lampiran 7**).

Di bawah ini hasil analisis konsentrasi Cr rata-rata pada setiap sampel yang diambil :

Tabel 4.13. Hasil Analisis Konsentrasi Cr dalam Tanah pada Seluruh Titik Sampling Selama 12 Jam

Area Sampel	Konsentrasi Cr rata-rata ($\mu\text{g/g}$)
Ao	509,524
I	124,086
II	111,457
III	155,699
Z	281,220
O	497,324

Dari data **Tabel 4.13** di atas terlihat bahwa konsentrasi Cr pada setiap titik sampel yang di ambil mengalami perubahan. Titik sampel Ao merupakan sampel tanah dengan konsentrasi awal, yaitu konsentrasi Cr sebelum teremediasi memiliki konsentrasi sebesar 509,524 $\mu\text{g/g}$. Setelah mengalami remediasi pada setiap area titik sampling mengalami penurunan konsentrasi Cr. Demikian pula pada area inefektif, pada area tersebut terjadi penurunan konsentrasi Cr walaupun tidak terlalu besar. Pada titik sampling O yang merupakan sampel tanah yang tidak mengalami remediasi, konsentrasi Cr mengalami penurunan menjadi 497,324 $\mu\text{g/g}$. Secara jelas dapat dilihat pada **Gambar 4.25** berikut ini :
(Lampiran 6).



Gambar 4.25. Grafik Konsentrasi Cr Rata-rata dalam Tanah di Seluruh Titik Sampling

Menurut *National Environment Protection Council, New Zealand*, ambang batas kontaminan Cr dalam tanah adalah 20,9 mg/kg (**Lampiran 8**). Walaupun belum mencapai nilai ambang batas yang diijinkan, pada masing-masing area titik sampling telah terjadi penurunan konsentrasi Cr setiap interval waktu 3 jam. Jadi konsentrasi Cr di tiap titik sampling mengalami perubahan selama 12 jam.

4.7. HASIL ANALISIS NILAI EFISIENSI KONSENTRASI Cr

Dari analisis data di depan dapat diketahui nilai efisiensi penurunan konsentrasi Cr setelah dilakukan remediasi elektrokinetik di setiap area efektif dan inefektif yaitu :

A. Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Area I

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

$$\begin{aligned}
 &= \frac{509,524 \mu\text{g} / \text{g} - 124,0855 \mu\text{g} / \text{g}}{509,524 \mu\text{g} / \text{g}} \times 100\% \\
 &= 75,65\%
 \end{aligned}$$

B. Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Area II

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\% \\
 &= \frac{509,524 \mu\text{g} / \text{g} - 111,4568 \mu\text{g} / \text{g}}{509,524 \mu\text{g} / \text{g}} \times 100\% \\
 &= 78,13\%
 \end{aligned}$$

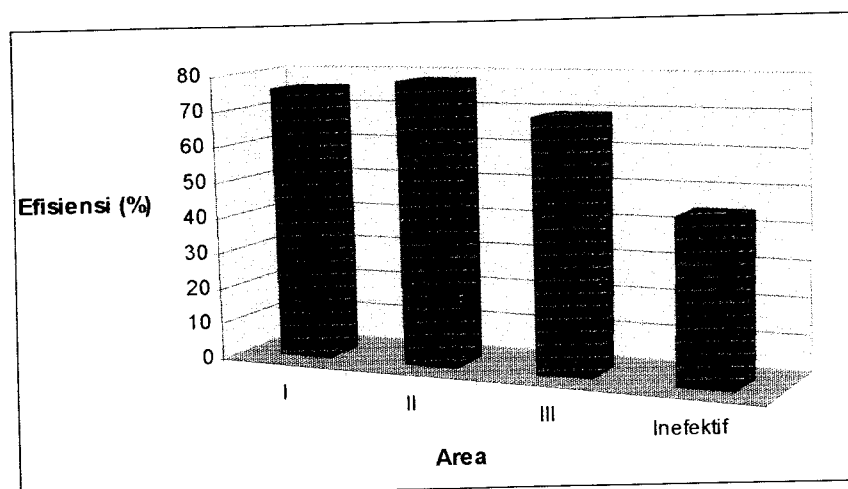
C. Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Area III

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\% \\
 &= \frac{509,524 \mu\text{g} / \text{g} - 155,6986 \mu\text{g} / \text{g}}{509,524 \mu\text{g} / \text{g}} \times 100\% \\
 &= 69,4\%
 \end{aligned}$$

D. Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Area In efektif

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\% \\
 &= \frac{509,524 \mu\text{g} / \text{g} - 281,2203 \mu\text{g} / \text{g}}{509,524 \mu\text{g} / \text{g}} \times 100\% \\
 &= 44,81\%
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas diketahui bahwa nilai efisiensi tertinggi di area efektif yaitu pada area II sebesar 78,1%. Efisiensi terendah di area efektif adalah pada area III yaitu hanya 69,4%. Pada area inefektif, nilai efisiensi sangat rendah dibanding nilai efisiensi pada area efektif yaitu 44,808%. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada **Gambar 4.26** berikut :



Gambar 4.26. Grafik Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Setiap Area

Dari grafik **Gambar 4.26** di atas dapat terlihat bahwa, nilai efisiensi terbesar terjadi pada area efektif II, dimana pada area II tersebut memiliki nilai efisiensi konsentrasi Cr sebesar 78,1 %. Sementara nilai efisiensi terendah terjadi pada area inefektif dengan nilai efisiensi rata-rata hanya 44,81 %. Hal-hal tersebut di atas dikarenakan area efektif merupakan area yang dipengaruhi oleh medan listrik yang paling kuat sehingga pada area-area efektif terjadi proses elektromigrasi atau migrasi ion Cr^{3+} secara optimum. Sedangkan pada area inefektif merupakan area di luar sistem elektroda (anoda dan katoda) sehingga pengaruh medan listrik pada area tersebut sangat kecil. Pada area III, nilai efisiensi konsentrasi Cr hanya 69,4%, lebih rendah jika dibandingkan efisiensi pada area efektif lainnya, ini dikarenakan penurunan konsentrasi Cr pada area III tersebut tidak terlalu besar selain itu area III merupakan area tempat terakumulasinya ion-ion Cr^{3+} yang berasal dari area I dan II (lihat **Gambar 4.13**).

Nilai efisiensi konsentrasi Cr di area efektif pada penelitian ini memiliki nilai efisiensi terendah sebesar 69,4 % dan efisiensi tertinggi sebesar 78,1 %.

4.8. PENGARUH REMEDIASI ELEKTROKINETIK terhadap ASPEK LINGKUNGAN

Dari hasil remediasi elektrokinetik selama 12 jam, didapat bahwa telah terjadi perubahan pH dan penurunan konsentrasi Cr pada tanah kaolinit. Kondisi area anoda cenderung asam dengan pH akhir remediasi sebesar 5,4 sedangkan kondisi pada area katoda cenderung basa dengan pH akhir 10,2. Penurunan konsentrasi Cr yang terjadi telah sesuai dengan yang diharapkan walaupun belum mencapai nilai ambang batas namun dapat disesuaikan dengan waktu remediasi. Akan tetapi, perubahan-perubahan pH yang terjadi pada kenyataannya dapat merubah stabilitas tanah yang diremediasi. Apabila tanah hasil remediasi tersebut akan digunakan sebagai lahan pertanian, maka kondisi asam dan basa pada tanah setelah remediasi dapat dinetralkan dengan melakukan pengapuran (CaCO_3) untuk area asam, sedangkan area pada kondisi basa dapat diasamkan misalnya dengan menambahkan asam nitrat. Selain netralisasi, tanah dapat kembali kepada kondisi semula secara alami dalam waktu yang cukup lama. Pada dasarnya peningkatan pH yang terjadi secara terus menerus dapat mengganggu kestabilan tanah. Untuk pencegahan peningkatan pH yang tajam tanpa terkontrol dapat dilakukan perhitungan

dari persamaan-persamaan yang didapat dari garis *trend* guna mengetahui pencapaian pH optimum sesuai dengan waktu dan konsentrasi yang diharapkan. Selain mengganggu kestabilan tanah, apabila pada tanah yang diremediasi tersebut terdapat sistem perpipaan, akibat adanya beda potensial yang cukup tinggi maka sistem perpipaan tersebut kemungkinan dapat mengalami korosi.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

1. Elektrokinetik konfigurasi 2D *hexagonal* dapat digunakan untuk meremediasi tanah terkontaminasi logam berat Cr.
2. Remediasi elektrokinetik dengan konfigurasi elektroda 2D *hexagonal* efisien untuk menurunkan konsentrasi logam berat Cr dalam tanah dengan nilai efisiensi 78,13 %.
3. Pada area katoda bersifat basa dengan nilai pH antara 8,4 sampai 10,2 sedangkan pada area anoda bersifat asam dengan nilai pH antara 3 sampai 5,4.
4. Konsentrasi Cr dalam tanah setelah remediasi pada area katoda lebih banyak dibanding pada area anoda dikarenakan terjadinya *electromigration* atau migrasi ion Cr³⁺ dari setiap area yang bergerak menuju katoda.
5. Semakin berkurangnya konsentrasi Cr, maka nilai resistivitas semakin besar dengan arus konstan.
6. Pada area inefektif, konsentrasi Cr sedikit berkurang karena masih dipengaruhi medan listrik dari sistem elektroda area efektif.

5.2. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, waktu dan jarak antar elektroda sangat berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi Cr, semakin lama waktu remediasi, maka semakin kecil konsentrasi Cr yang terkandung di dalam tanah. Semakin kecil jarak antar elektroda, semakin cepat laju ion-ion bergerak sehingga memungkinkan semakin cepat terjadinya penurunan konsentrasi Cr.

1. Perlu dikaji lebih lanjut guna menemukan waktu dan jarak elektroda yang lebih efektif, sehingga kemungkinan nilai ambang batas konsentrasi Cr dapat dicapai.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut guna mengetahui dampak negatif dari penerapan elektro remediasi terhadap lingkungan dan solusinya.
3. Perlu penelitian lebih lanjut mengenai elektro remediasi dengan menggunakan parameter yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Alshawabkeh, A. N., 1999, *Optimization of 2D Electrode Configuration for Electrokinetic Remediation*, *Juornal of Soil Contamination*, USA.
- Alshawabkeh, A. N., 2000, *Final In-Situ Electrokinetic Remediation of Metal Contaminated Soils*. [http://: www.US Army Environmental Center](http://www.USArmyEnvironmentalCenter.com)
- Alshawabkeh, A. N., 2001, *Basic and Application of Electrokinetic Remediation*, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ).
- Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N., 1993, *Principles of Electrokinetic Remediation*, *Environmental Science and Technology*, New Delhi, India.
- Acar, Y.B., Gale R. J., Putnam, G. A, Hamed, J. and Wong, R. L., 1990, *Electrochemical processing of Soils*, Betlehem.
- Bueche, F. J., 1989, *Theory and Problem of College Physics*, MacGraw Hill, Inc.
- Chan, M. S. and Lynch, J. R., 2002, *Two-Dimensional Electrokinetic Remediation of Soil*, Cambridge University Engineering Departement, UK.
- Donald, L. W. and Debra J. T., 1994, *Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils*, Marcel Dekker.Inc, USA.
- Echols, J. M., Shadily, H., 1990, *Kamus Inggris Indonesia*, PT. Gramedia, Jakarta.

- Evanko, C. R., 1997, *Remediation of Metals Contaminated Soil and Groundwater*, Groundwater Technologies Analysis Centre, USA.
- Kim, H. T., 1998, *Dasar-Dasar Kimia Tanah*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Manahan, S. E., 1972, *Environmental Chemistry*, Willard Grant Press, Boston.
- Metcalf and Eddy, 1991, *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse*, Mc.Graw Hill, USA.
- Palar, H., 1994, *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*, Rineka Cipta, Jakarta.
- Pamukcu, S., 1994, *Electro-Chemical Technologies for In-Situ Restoration of Contaminated Subsurface Soils*, Departement of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Betlehem, USA.
- Parizek, J., 1978, *Interaction of Se with Hg, Cd and other metals*, University Park Press.
- Petrucci, R. H., 1993, *Kimia Dasar Prinsip dan Terapan Modern*, Gelora Aksara Pratama, Bogor.
- Setiono, L., Hadyana, A., 1990, *Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimakro*, (Terjemahan dari Vogel, 1979), Kalman Media Pustaka, Jakarta.
- Solikun, 2004, *Sungai Bengawn Solo Tercemar Logam Berat*, SCTV, Jakarta.
[http://: www.liputan6.com](http://www.liputan6.com)
- Wardana, W.A., 1995, *Dampak Pencemaran Lingkungan*, Andi Offset, Yogyakarta.

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

PEMBUATAN LARUTAN Cr SEBAGAI KONTAMINAN

- A. Konsentrasi Cr dalam tanah kaolinit, Godean : 8,3 $\mu\text{g/g}$ (ppm)
- B. Tanah disimulasi dengan Cr_2O_3 ($M = 152 \text{ gr/mol}$) sampai konsentrasi Cr dalam tanah : 500 $\mu\text{g/g}$
- C. Konsentrasi Cr yang harus ditambahkan dalam tanah adalah
- $$= 500 \mu\text{g/g} - 8,3 \mu\text{g/g}$$
- $$= 491,7 \mu\text{g/g} \approx 0,5 \text{ gr/kg}$$
- D. Berat sampel tanah = Berat tanah + berat air
- $$= 150 \text{ kg} + 50 \text{ kg} = 200 \text{ kg. maka}$$
- E. Cr yang harus ditimbang :

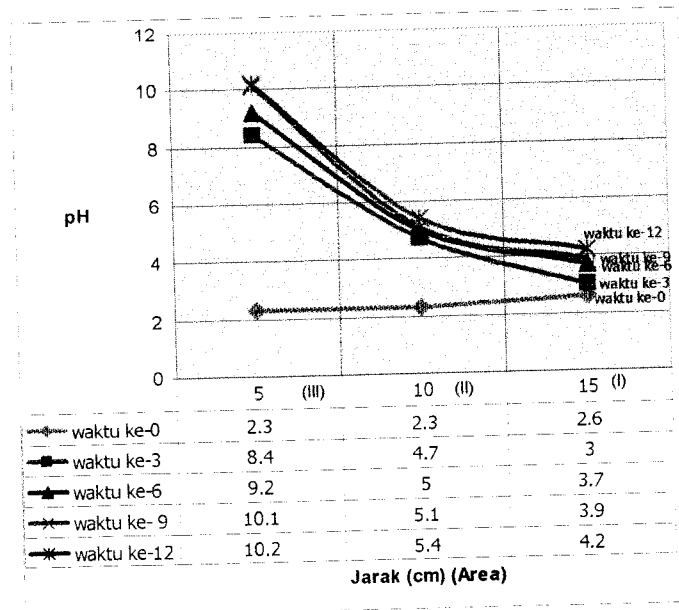
$$\cong \frac{BM.Cr_2O_3}{BA.Cr} \times 0,5 \text{ gr / kg}$$
$$\text{Cr}_2\text{O}_3 \cong \frac{152 \text{ gr / mol}}{104 \text{ gr / mol}} \times 0,5 \text{ gr / kg} \times \frac{100}{60}$$
$$\cong 1,22 \text{ gr / kg}$$

Maka Cr_2O_3 yang harus ditimbang untuk tanah sebanyak 200 kg adalah = 1,22 gr/kg x 200 kg = 244 gr.

LAMPIRAN 2

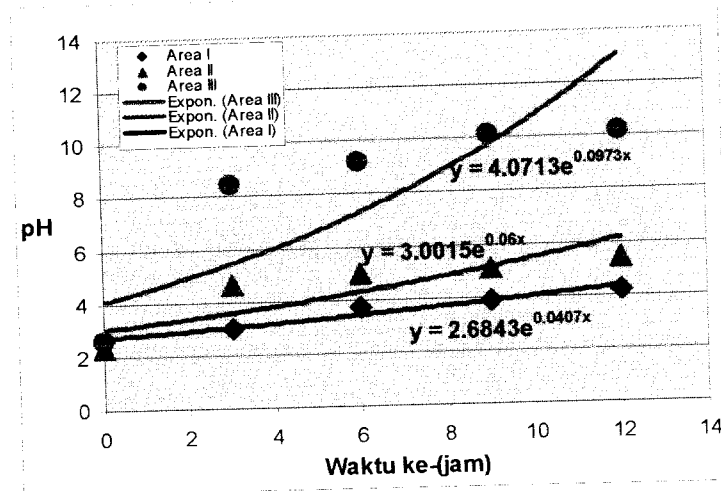
HASIL ANALISIS pH PADA SETIAP AREA EFEKTIF

Jarak dari katoda (cm)	pH	Jarak dari katoda (cm)	pH
5	2.3	10	5
5	8.4	10	5.1
5	9.2	10	5.4
5	10.1	15	2.6
5	10.2	15	3
10	2.3	15	3.7
10	4.7	15	3.9
		15	4.2



LAMPIRAN 3

HUBUNGAN pH terhadap WAKTU di AREA EFEKTIF



PERHITUNGAN pH dan WAKTU OPTIMUM

AREA III $y = 4,0713e^{0,0973x}$
 pH maksimum pada area III = 11, maka

$$\frac{\ln y}{\ln 4,0713} = 0,0973x$$

$$\frac{\ln 11}{\ln 4,0713} = 0,0973x$$

$$x = 17 \text{ jam}$$

AREA I $y = 2,6843e^{0,0407x}$
 Dengan waktu yang sama maka :

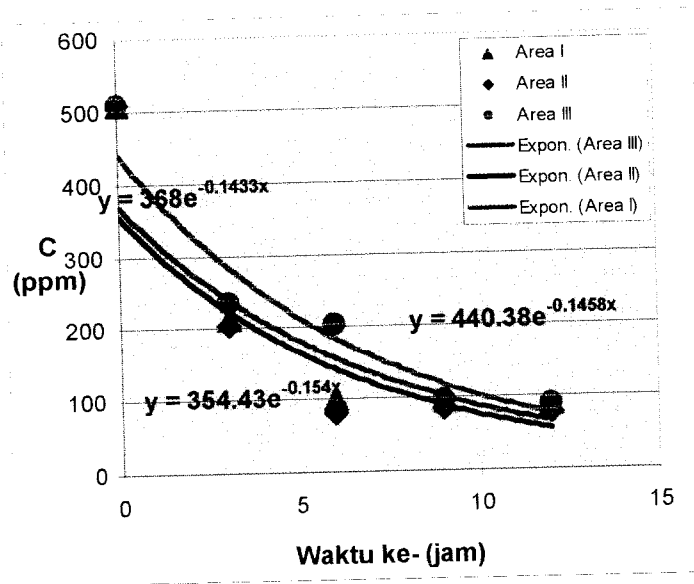
$$\frac{\ln y}{\ln 2,6843} = 0,0407x \Rightarrow \frac{\ln y}{\ln 2,6843} = 0,0407(17) \Rightarrow y = 1,9$$

AREA II $y = 3,0015e^{0,06x}$
 Dengan waktu yan sama maka :

$$\frac{\ln y}{\ln 3,0015} = 0,06x \Rightarrow \frac{\ln y}{\ln 3,0015} = 0,06(17) \Rightarrow y = 3$$

LAMPIRAN 4

HUBUNGAN KONSENTRASI Cr terhadap WAKTU di AREA EFEKTIF



Area III $y = 440e^{-0.1458x}$
Dengan waktu (x) = 17 jam, maka :

$$\frac{\ln y}{\ln 440} = -0,1458(17) \Rightarrow y = 3 \cdot 10^{-7}$$

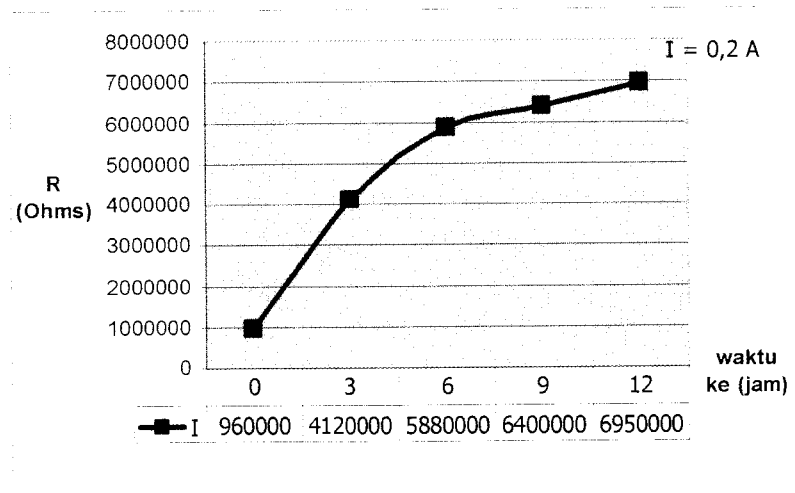
Area II $y = 354e^{-0.154x}$
Dengan waktu yang sama (x=17) : $\frac{\ln y}{\ln 354} = -0,154(17) \Rightarrow y = 21 \cdot 10^{-7}$

Area I $y = 368e^{-0.1433x}$
Dengan waktu yang sama (x=17) : $\frac{\ln y}{\ln 368} = -0,143(17) \Rightarrow y = 6 \cdot 10^{-7}$

LAMPIRAN 5

HASIL ANALISIS ARUS dan RESISTENSI pada SETIAP AREA

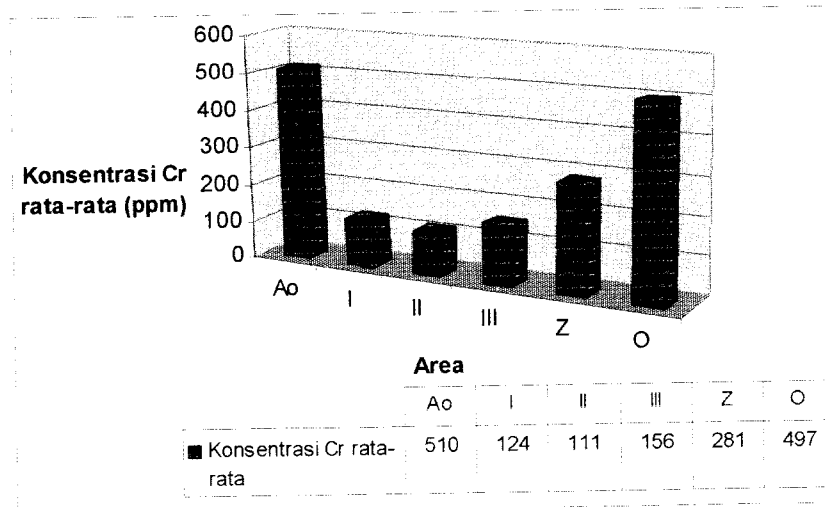
Waktu ke- (jam)	Resistensi (Ω)	Arus (Ampere)
0	96000	0.2
3	412000	0.2
6	588000	0.2
9	640000	0.2
12	695000	0.2



LAMPIRAN 6

KONSENTRASI Cr RATA-RATA dalam TANAH di SELURUH TITIK SAMPLING

Area	Konsentrasi Cr rata-rata ($\mu\text{g/g}$)
Ao	510
I	124
II	111
III	156
Z	281
O	497



ARDA
KI
AN IL

m
sami
uan
alisis

DE SA

Lempr

LAMPIRAN 7
HASIL ANALISIS KONSENTRASI Cr
dan pH



BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MAJU

Jl. Babarsari Kotak Pos 1008, Yogyakarta 55010, Telepon (0274) 488435/484436

LABORATORIUM KIMIA ANALITIK

Bentuk Sampel : Padatan
Pengirim Sampel : Siti Fatimah
Asal Sampel : Lempung
Parameter : Kadar Crom (Cr) dalam lempung
Metode : APN

No	Kode Sampel	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)	No	Kode Sampel	Konsentrasi ($\mu\text{g/g}$)
1	Ao	509,524	16	E2,2	83,989
2	A1	206,551	17	E3,2	85,479
3	A1,2	94,006	18	F1,2	83,742
4	B1	107,081	19	F2,2	73,065
5	C1	101,122	20	F3,2	92,928
6	D1	88,967	21	Z1	385,572
7	D2	83,742	22	Z2	231,438
8	D3	96,566	23	Z3	322,782
9	E1	94,086	24	Z4	276,353
10	E2	80,869	25	Z5	274,620
11	E3	201,843	26	Z6	291,430
12	F1	217,571	27	Z3,1	207,821
13	F2	202,689	28	Z5,2	259,738
14	F3	235,182	29	O	497,324
15	E1,2	88,211			



LABORATORIUM KUALITAS LINGKUNGAN
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang km 14.4 Yogyakarta 55584. Phone 0274-895042, 895707, Fax 0274-895300

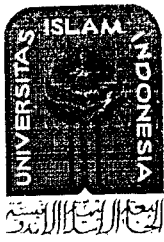
REMEDIASI ELEKTROKINETIK dengan MODEL KONFIGURASI
ELEKTRODA 2-D *HEXAGONAL* pada TANAH TERKONTAMINASI LOGAM

BERAT Cr

A. Hasil Pengukuran pH pada Area Efektif

Waktu ke- (jam)	Area Anoda	pH
0	A1	2,6
3	A1	2,8
	F1	3,2
6	B1	3,8
	E1	3,6
9	C1	4,0
	D1	3,8
12	A1	4,1
	F1	3,8
	E1	4,8

Waktu ke- (jam)	Area Katoda	pH
0	A	2,3
3	A	8,1
	F	8,7
6	B	9,5
	E	8,9
9	C	10,2
	D	10,0
12	A	9,5
	F	10,0
	E	11,2



LABORATORIUM KUALITAS LINGKUNGAN
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang km 14,4 Yogyakarta 55584. Phone 0274-895042. 895707 Fax 0274-895030

Waktu ke- (jam)	Area II	pH
0	A2	2,3
3	A2	4,5
	F2	4,8
6	B2	5,0
	E2	5,0
9	C2	5,2
	D2	5,0
12	A2	5,8
	F2	4,9
	E2	5,5

B. Hasil Pengukuran Resistensi dan Arus

Waktu ke- (jam)	Resistensi ($k\Omega$)	Arus (A)
0	96	0
3	412	0,2
6	588	0,2
9	640	0,2
12	695	0,2

LAMPIRAN 8

AMBANG BATAS KONTAMINAN TANAH

Soil samples XYZ-1 – XYZ-6 were taken for analysis of metals for an area suspected of metals contamination. Average results are presented below.

Contaminant	Average Concentration mg/kg 0.2 m	Average Concentration mg/kg 0.5 m	Average Concentration mg/kg 1.0 m	Human Health Guidelines	Ecological Guidelines
Copper	120.0	8.5	1.0	Not limited ¹	100
Chromium (9a)	20.9	2.0	<0.2	360 ¹	1 (Cr VI) 400 (Cr III)
Arsenic	17.2	2.1	<0.2	500 ¹	20
Cobalt	3.6	<0.2	<0.2	500 ²	
Chromium	0.8	<0.2	<0.2	100 ²	3
Nickel	15.3	<0.2	<0.2	3000 ²	60
Zinc	520.3	180.5	12.4	35000 ²	200

1 Guidelines for Timber Treatment Chemicals: 1997.

2 National Environmental Protection Measure: Assessment of site Contamination Schedule B (1) Soil Investigation Levels. National Environment Protection Council 1999.

The results show that ecological guideline values for soil are exceeded for copper, chromium and zinc. Further work analysing Cr VI specifically would be needed to check whether the concentrations measured are of concern, as Cr VI has a greater toxicity than Cr III.

The assessment indicates that average concentrations of copper and zinc exceed guideline values only in the shallow soils

LAMPIRAN 9

PENELITIAN REMEDIASI ELEKTROKINETIK

Table A 2.3: Synthesis of Laboratory Data Reported by Various Investigators on the Removal of Chemical Species from Soils

Ref.	Soil Type	Pore Fluid	Species	Initial Conc.	Current Density	Voltage	Duration (hrs)	Energy $\Delta W/\Delta m^3$	Removal (%)	Remarks
1	Silty Sand	NA	Cu	617	.01-.05 mA/cm ²	0.165 V/cm	24-72	NA	50	Cylindrical Specimens (D=0.75in, L=6 in.). Final concentration 290-543 mg/kg.
2,3	Kaolinite	DIW	Pb	100-1064 mg/kg	0.012-0.123 mA/cm ²	2.5 V/cm	100-1285	29-60	75-95	Bench-scale tests conducted on kaolinite samples loaded with Pb at concentrations below and above the CEC. Demonstrates the effect of pH changes on the process.
2,4	Kaolinite	DIW	Cd Cr	100-140 mg/kg	0.037 mA/cm ²	2-2.5 V/cm	480-1600	50-120	92-100 65-70	Bench-scale tests demonstrate the feasibility of the process. The study demonstrates the development of nonlinear electric potential distribution due to the electrochemical changes across the sample.
5	Silty Clay	GW	Cr	150-1500 mg/kg	NA	0.1-1.0 V/cm	24-168	NA	NA	Field specimens are used (D=5.1 cm, L=2.5cm to 6.7 cm). Hydraulic and electric potentials are used simultaneously.

DIW: Deionized Water, DW: Distilled Water, GW: Ground Water, HS: Humic Solution, TW: Tap Water, NA: Not Available.

Table A 2.3: Synthesis of Laboratory Data Reported by Various Investigators on the Removal of Chemical Species from Soils (cont'd)

Ref.	Soil Type	Pore Fluid	Species	Initial conc.	Current Density	Voltage	Duration (hrs)	Energy	Removal (%)	Remarks
6	Kaolinite	DIW	Cu $Cu(NO_3)_2$ sol.	1.3 mg/kg	0.3-2.0 mA	0.25 V/cm	16-48	4.5-7.4	NA	Demonstrates that buffering the anode results in higher electroosmotic flow than buffering the cathode. Citrate treatment was not effective in removing precipitated copper from the cathode zone.
7, 19	Kaolinite	DW	Cd, Co, Ni, Sr	400-700 mg/kg	NA	30 v 4 V/cm	24-30	NA	85-95	Conducted bench-scale tests on the feasibility of the process. The results display that removal efficiencies (or % removal) is higher for high initial concentrations. The results show that kaolinite has the highest removal followed by clayey sand while Na-montmorillonite shows the lowest removal efficiency
	Kaolinite	HS.	Cd, Co, Ni, Sr	600-750 mg/kg	NA	30 v 4 V/cm	24-30	NA	85-95	
	Kaolinite	GW	Cd, Co, Ni, Sr	550-1100 mg/kg	NA	30 v 4 V/cm	24-50	NA	85-95	
	Na-Montm.	DW	Cd, Co, Ni, Sr	4500-3600 mg/kg	NA	30 v 4 V/cm	24-50	NA	85-95	
	Sand + 10% Na-Montm.	DW	Cd, Co, Ni, Sr	400-1500 mg/kg	NA	30 v 4 V/cm	24-50'	NA	85-95	

DIW: Deionized Water, DW: Distilled Water, GW: Ground Water, HS: Humic Solution, TW: Tap water, NA: Not Available.

Table A 2.3: Synthesis of Laboratory Data Reported by Various Investigators on the Removal of Chemical Species from Soils (cont'd)

Ref.	Soil Type	Pore Fluid	Species	Initial Conc.	Current Density	Voltage	Duration (hrs)	Energy kWh/m ³	Removal (%)	Remarks
8	Kaolinite	Deion. Water	Uranium	1000 pCi/g	0.127 mA/cm ²	0.5-12 V/cm	85-550	50-300 kWh/m ³	85-95	The results demonstrate the feasibility of removing radionuclides from bench-scale kaolinite sampler. Thorium and radium removal were incomplete due to formation of (horium hydroxide and radium sulphate.
	Kaolinite	Deion. Water	Thorium	41-313 pCi/g	0.127 mA/cm ²	0.5-12 V/cm	144-785	100-300 kWh/m ³	20-75	
9	Unsat. Sand	0.005M CaSO ₄	Chromate	100 mg/kg	0.35 mA/cm ²	89-150 V 4-7 V/cm	22	NA	NA	Demonstrates the efficiency of using the process for partially saturated samples. Rate of ion-migration is 20 times the rate of electroosmosis.
10	Unsat. Sand	NA	Cu (CuSO ₄ sol.)	617 mg/l	NA	2 V 0.13 V/cm	3, 5, 7, and 9 days	NA	NA	Fully saturated samples showed higher removal efficiencies than unsaturated samples.
11	Sand	DW	CuSO ₄	0.001M CuSO ₄ (65 mg/l Cu Sol.)	NA	2.5 V 2.2 V/cm	7-48	NA	NA	Demonstrates the efficiency of using ion-migration for preconcentration of ions that are difficult to remove by pump-and-treat!
12, 13	Altamont Clay (Illite)	NaCl Sol.	NaCl	0.02N NaCl	NA	10 V 0.1 V/cm	500 day	NA	NA	Investigates the feasibility of using electrokinetic clay barriers.

DIW: Deionized water, DW: Distilled Water, GW: Ground Water, HS: Humic Solution TW: Tap Water, NA: Not Available.

Table A 2.3: Synthesis of Laboratory Data Reported by Various Investigators on the Removal of Chemical Species from Soils (cont'd)

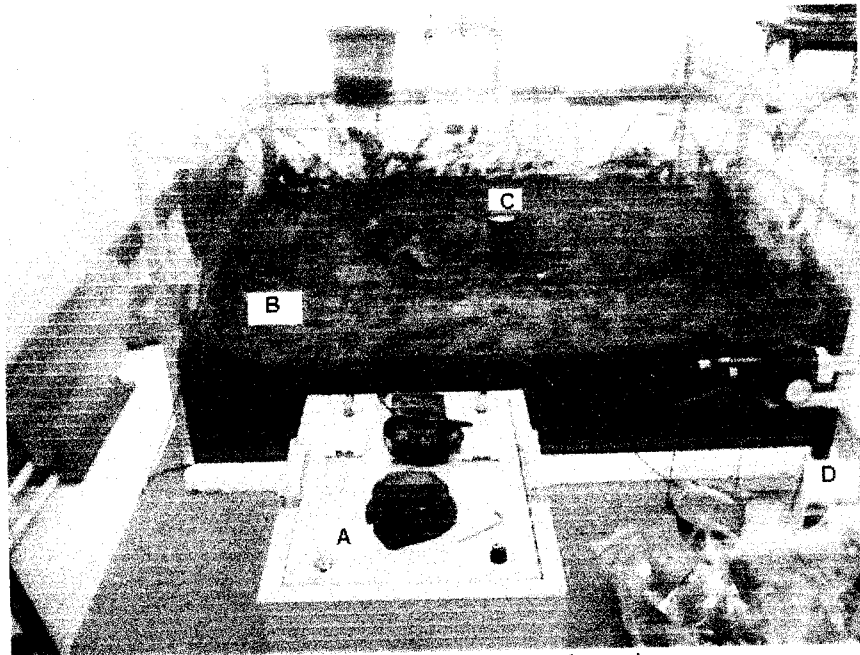
Ref.	Soil Type	Pore Fluid	Species	Initial Conc.	Current Density	Voltage	Duration (hrs)	Energy kWh/m ³	Removal (%)	Remarks
14, 15, 16	Kaolinite	NA	acetic acid	0.5 M, 0.1 M	NA	2s v	20-100 days	3.7 Kwh/t	95 45	0.1M NaCl purging solution was used to optimize the process.
	Kaolinite		Phenol	450 ppm 45 ppm	NA	0.62 V/cm	up 10 60 days	5.3-260 kwh/t	95 75	
17	Kaolinite	DIW	Phenol	500 mg/kg	0.037 mA/cm ²	0.4-2.4 V/cm	78-144	18-39	85-95	Most of the phenol removed from the sample was collected with the effluent.
18	Kaolinite	TW	BTXs Comp.	1-150 mg/kg	NA	0.4 V/cm	NA	NA	see remarks	Different organics (TCE 150 mg/kg, benzene 130 mg/kg, toluene 70 mg/kg, m-xylene 30 mg/kg) showed transport and removal from cylindrical bench-scale samples (1.-30cm) by electroosmosis.
19	Kaolinite Na-Mont Sand	DW GW HS	Aceton (see remarks)	100-6800 ppm	NA	30 v 4 V/cm	24-50	NA	Varies 5.8-100	Different organics (acetic acid, acetone, phenol, and hexachlorobenzene) showed transport and accumulation at center and towards the cathode.

DIW: Deionized Water; DW: Distilled Water, GW: Ground Water, HS: Humic Solution, TW: Tap Water, NA Not Available

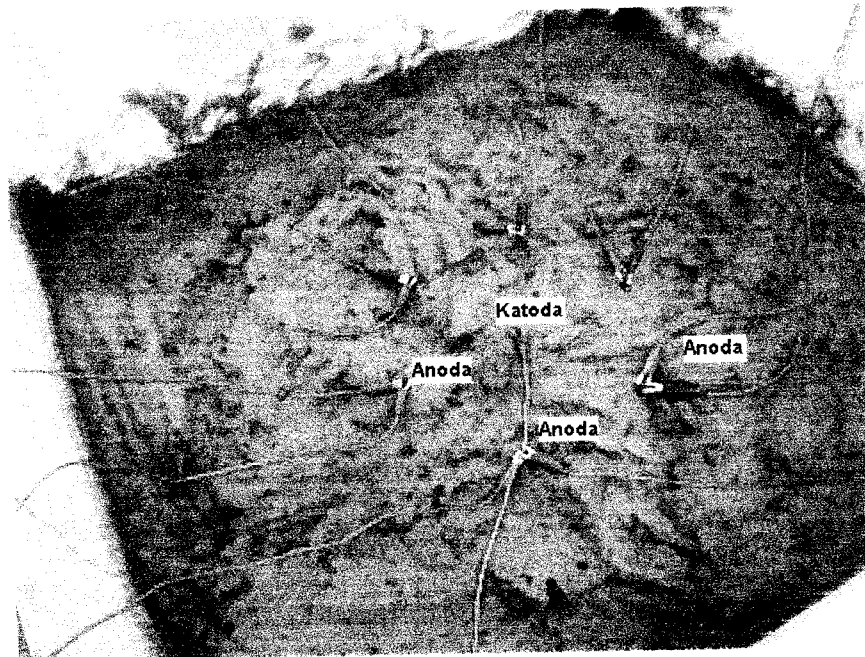
Table 2.4: References for Data Presented in Table 2.3

- 1 Runnels and Larson (1986)
- 2 Hauled (1990)
- 3 Hamed, Acar, and Gale (1991)
- 4 Acar, Hamed, Alshawabkeh, and Gale (1994)
- 5 Banerjee, Horng, Ferguson, and Nelson (1990)
- 6 Eykholt (1992)
- 7 Pamukcu and Wittle (1992)
- 8 Ugaz, Puppala, Gale, and Acar (1994)
- 9 Lindgren, Mattson, and Kozak (1992)
- 10 Dabab, Kelly, and Godaya (1992)
- 11 Runnels and Wahli (1993)
- 12 Yeung (1990)
- 13 Mitchell and Yeung (1991)
- 14 Shapiro, Renauld, and Probststein (1989)
- 15 Shapiro and Probststein (1993)
- 16 Probststein and Hicks (1993)
- 17 Acar, Li, and Gale (1992b)
- 18 Bruell, Segal, and Walsh (1992)
- 19 Wittle and Pamukcu (1993)

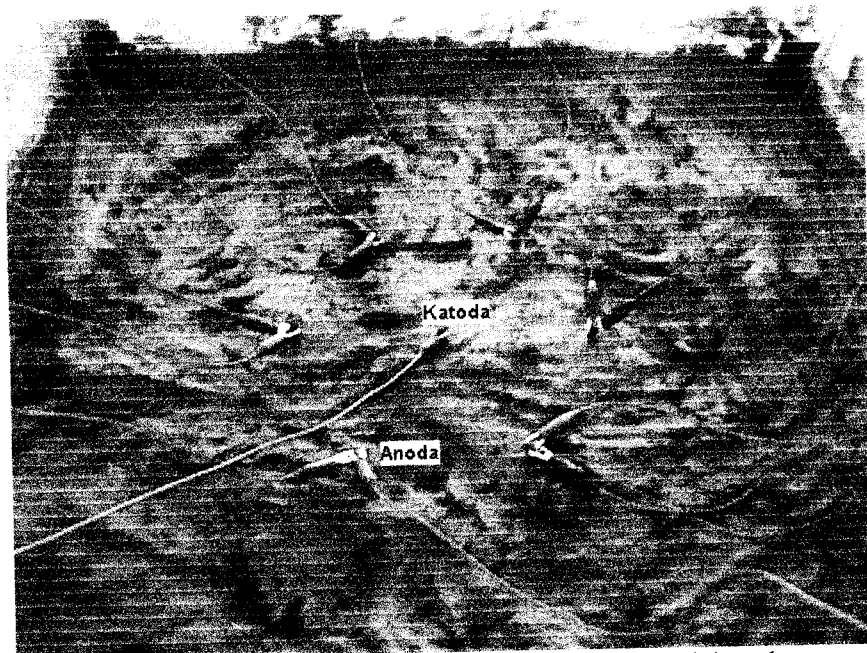
LAMPIRAN 10
DOKUMENTASI PENELITIAN



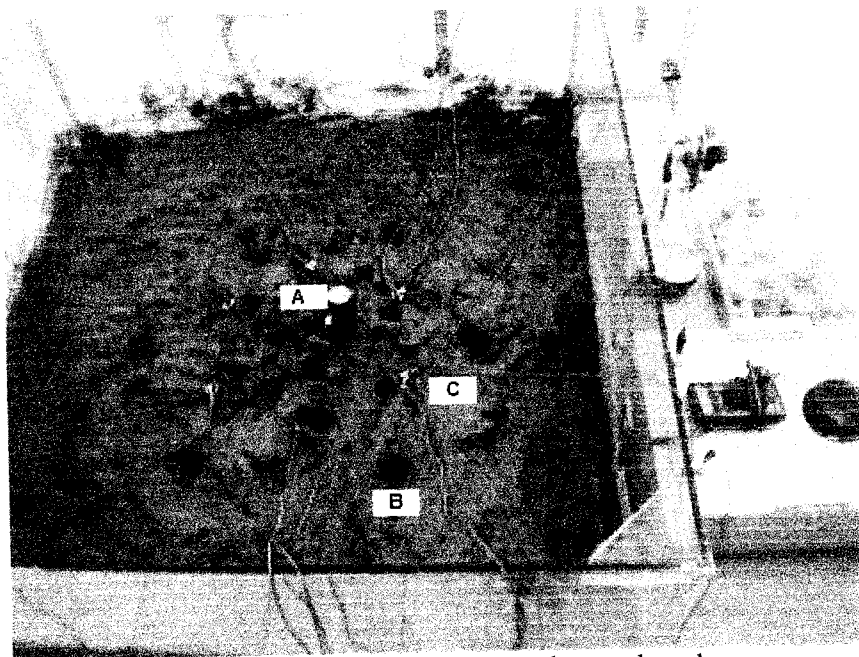
Gambar 1. *Setting* reaktor eksperimen
Keterangan : A. *power supply* B. Bak kaca
C. pH meter D. Neraca



Gambar 2. Media penelitian dalam bak reaktor



Gambar 3. Konfigurasi Elektroda *hexagonal* dengan elektroda pusat adalah katoda



Gambar 4. Pengukuran pH pada area katoda
Keterangan : A. pHmeter, B. media yang diambil sebagai sampel,
C. Anoda