

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	

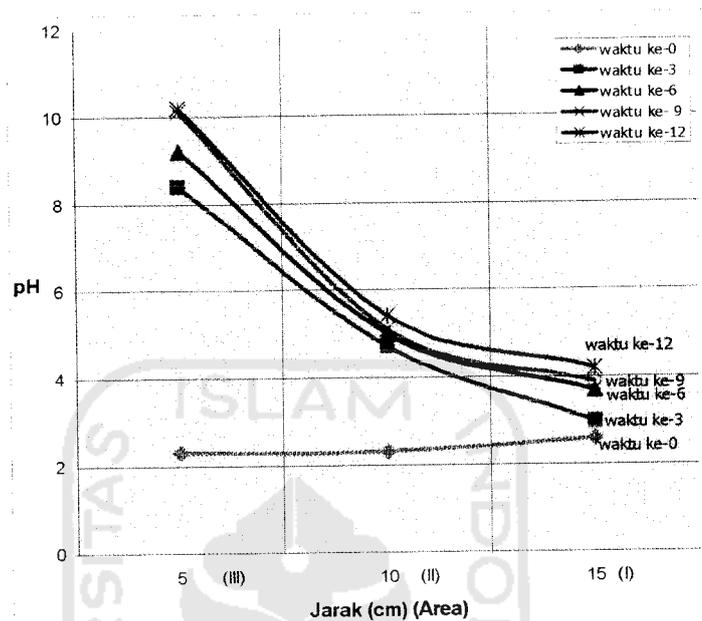
Selain pada area anoda dan katoda, pengukuran pH dilakukan pula diantara anoda dan katoda yaitu area yang letaknya 10 cm dari anoda dan katoda, disebut sebagai area II.

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).

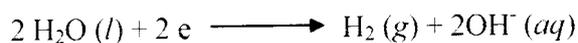


Gambar 4.1. Grafik Hubungan pH terhadap Jarak (Area)

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)

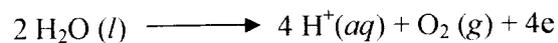
Reduksi air :



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 :

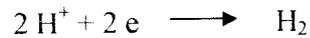


Reaksi di atas menjelaskan reaksi oksidasi air pada area anoda (I) dimana terjadi pelepasan elektron sebanyak $4e$ dan menghasilkan ion H^+ yang berarti bahwa pada area I mengalami kondisi asam (Setiono,1990).

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 :



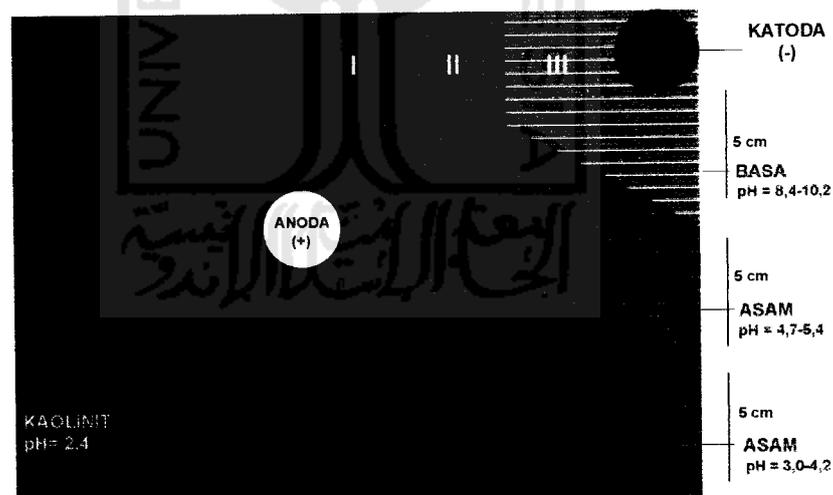
Sedangkan reaksi yang terjadi pada katoda adalah bahwa ion-ion hidrogen bermigrasi ke arah katoda dengan membentuk molekul-molekul hidrogen, yang dilepaskan dalam bentuk gas hidrogen : (Setiono,1990)



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.

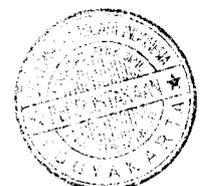
Daya hantar larutan pada proses *electrolysis* ini disebabkan karena adanya ion-ion (partikel bermuatan) yang apabila dialirkan listrik akan bermigrasi ke arah elektroda yang muatannya berlawanan, karena gaya elektrostatik.

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



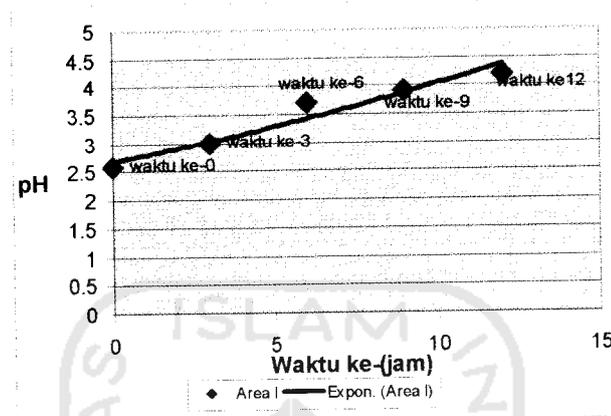
Gambar 4.2. Perbedaan asam dan basa pada potongan area titik sampling

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

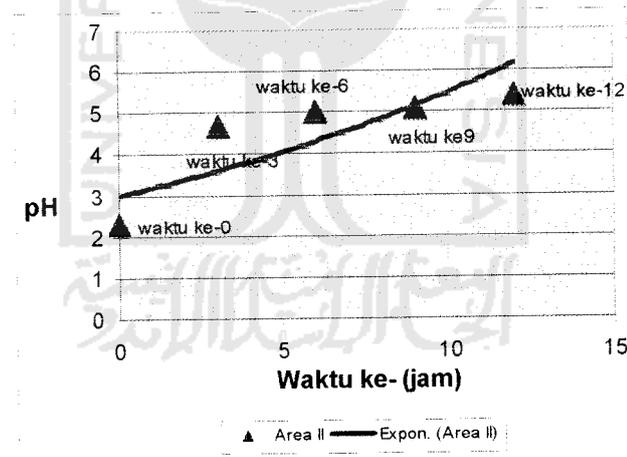


waktu di tiap-tiap area efektif, yang disesuaikan dengan data dari Tabel

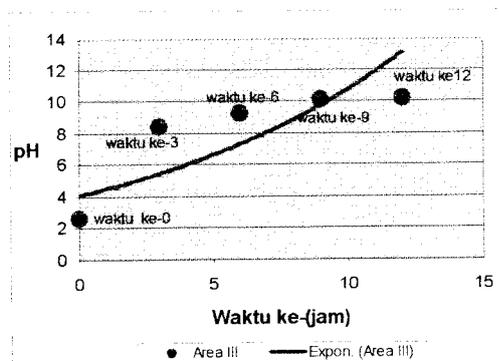
4.1 sampai Tabel 4.3 :



Gambar 4.3. Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area I

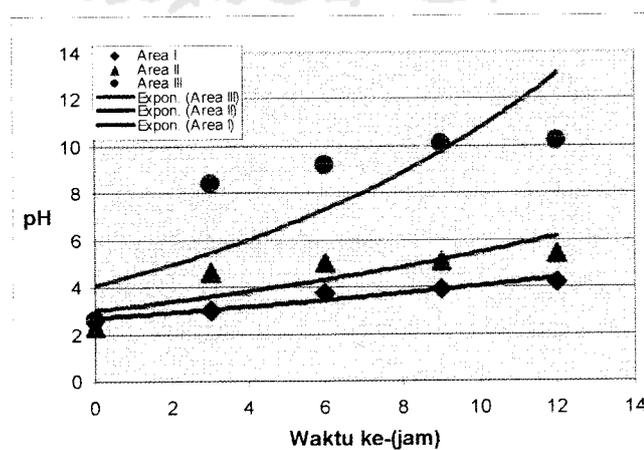


Gambar 4.4. Grafik Hubungan pH terhadap Waktu di Area II



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.

Alshawabkeh (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 (Alshawabkeh, 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 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	

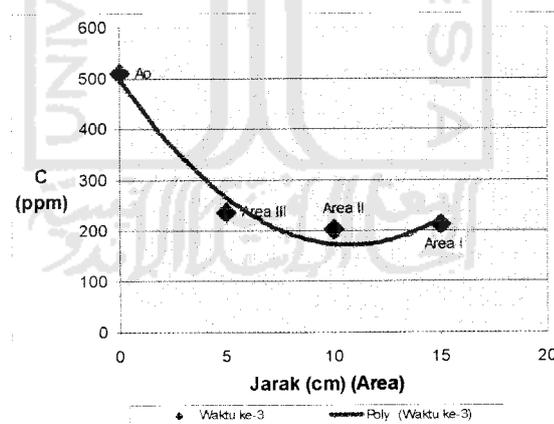
Tabel 4.6. Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area II

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	

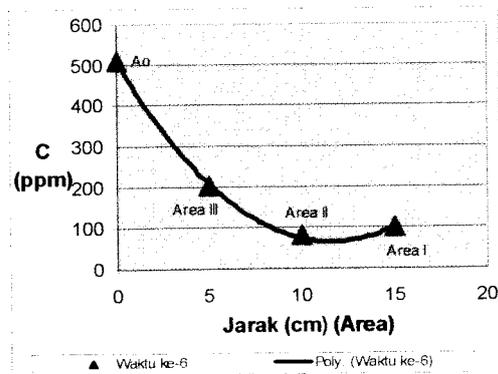
Tabel 4.7. Konsentrasi Cr Rata-rata pada Area III

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	

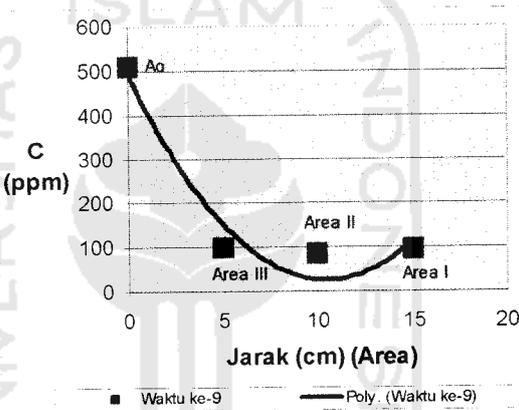
Dari data pada tabel-tabel di atas, dapat dibuat grafik hubungan antara variabel konsentrasi Cr, jarak dan waktu di area efektif seperti pada gambar-gambar berikut ini :



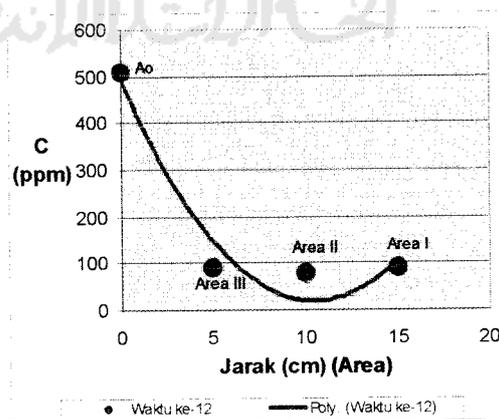
Gambar 4.7. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-3 Jam



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

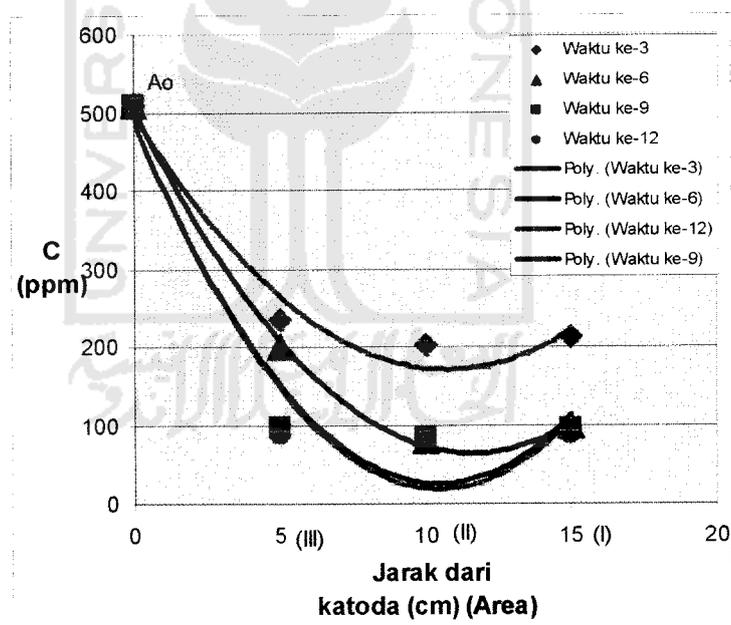


Gambar 4.9. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Jarak pada Waktu ke-9 Jam



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.

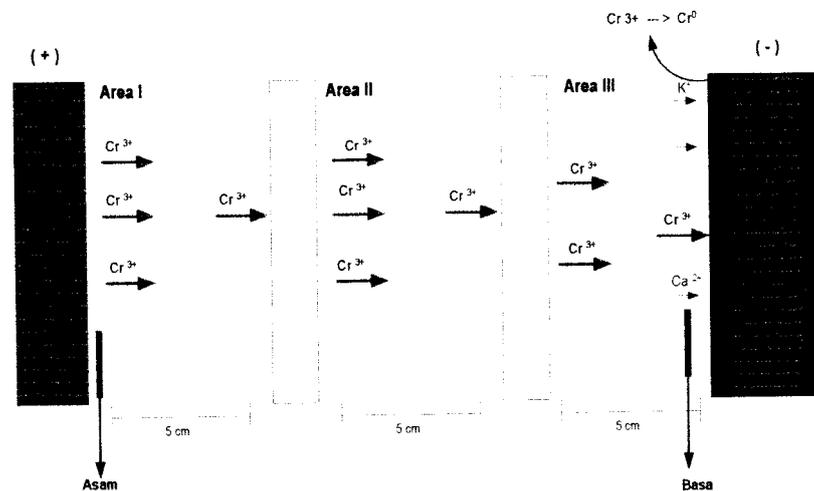
Hal senada juga diungkapkan oleh Alshawabkeh (1999) bahwa adanya penurunan konsentrasi ion-ion karena telah terjadi proses

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 anion-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**.

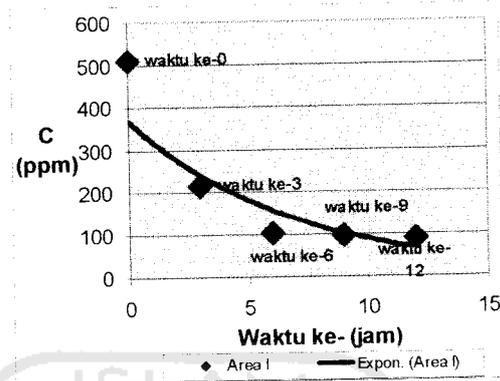


Gambar 4.12. Arah proses elektromigrasi atau migrasi ion pada anoda dan katoda

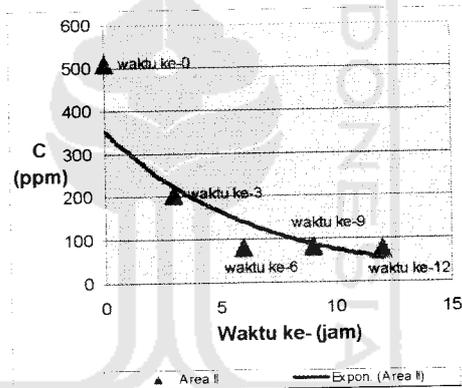
Dari **Gambar 4.12** tersebut terlihat bahwa pada saat terjadi elektromigrasi atau migrasi ion, ion-ion bermuatan positif (kation) akan saling berebutan menuju katoda. Sehingga konsentrasi ion-ion bermuatan positif akan terakumulasi pada area katoda.

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

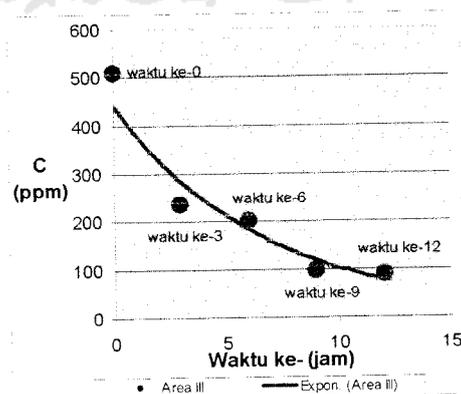
menunjukkan fenomena (*trend*) yang terjadi dalam hubungan konsentrasi Cr terhadap waktu remediasi pada masing-masing area efektif :



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

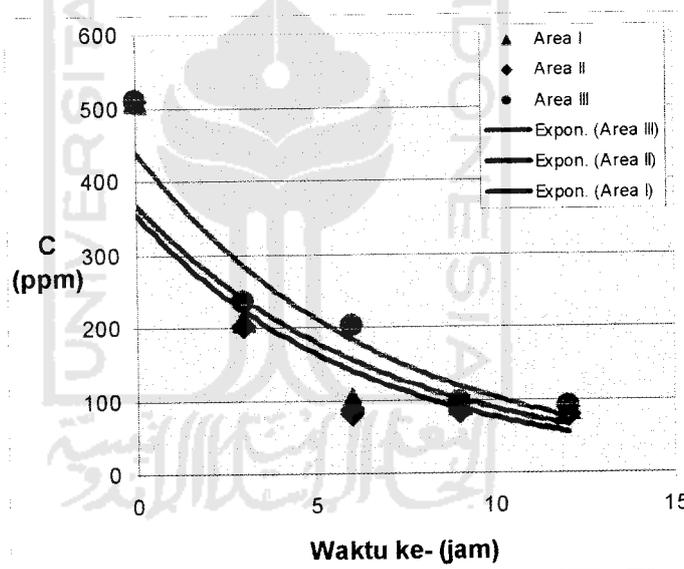


Gambar 4.14. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr terhadap Waktu di Area II



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**).

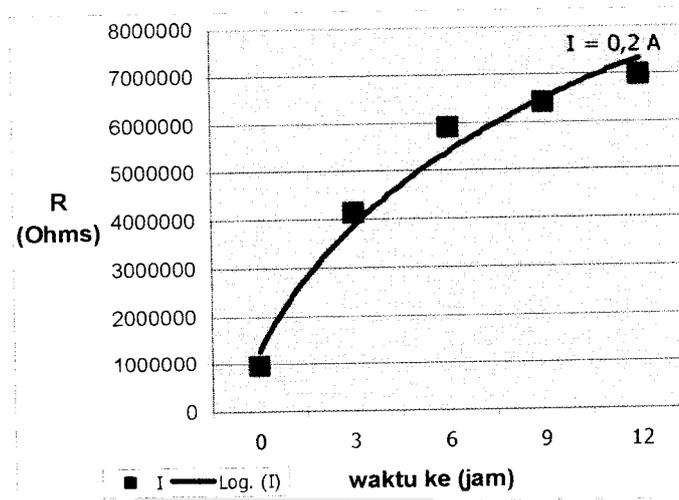
4.3. HASIL ANALISIS pada ARUS dan RESISTENSI

Pengukuran dilakukan pada arus dan resistensi dengan interval waktu tiap 3 jam. Data hasil pengukuran tersebut dapat dilihat pada 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

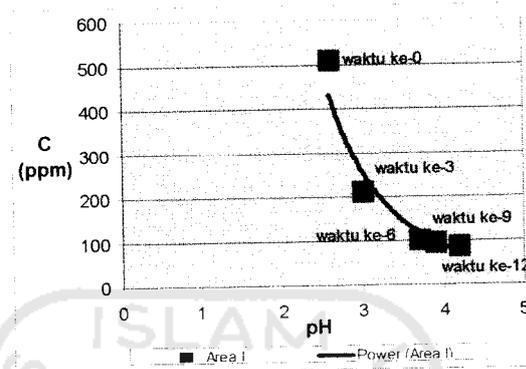
Tabel 4.10. Hubungan Konsentrasi Cr dan pH pada Area II

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

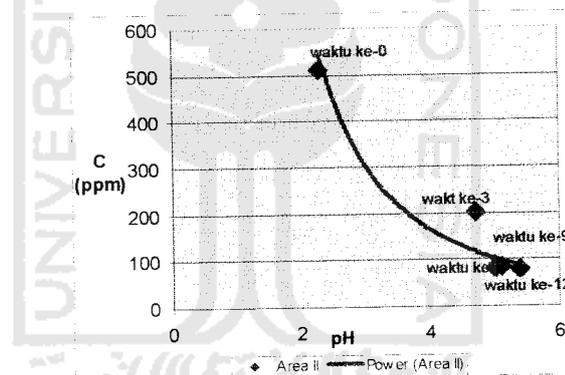
Tabel 4.11. Hubungan Konsentrasi Cr dan pH pada Area III

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

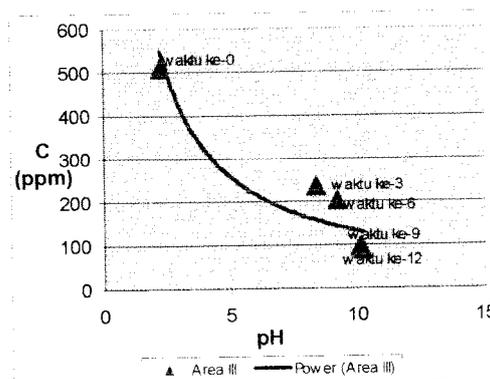
Dari Tabel 4.9 sampai Tabel 4.11 tersebut dapat dibuat grafik hubungan antar konsentrasi Cr dan pH pada tiap-tiap area efektif :



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



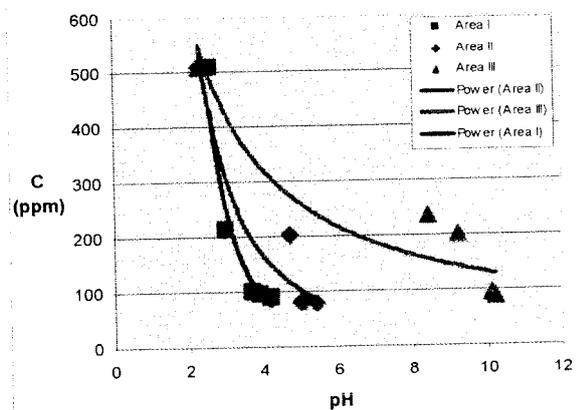
Gambar 4.19. Grafik Hubungan Konsentrasi Cr dan pH di Area II



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

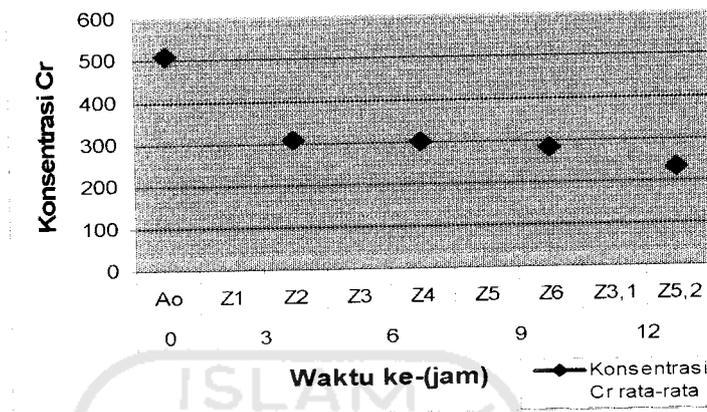
Selain pada area efektif, analisis konsentrasi Cr dilakukan juga pada area inefektif, area yang terletak di luar area efektif. Pengambilan sampel dan data pada area inefektif (Z) ini adalah sebagai perbandingan dengan area efektif. Area inefektif merupakan area yang berada di luar daerah elektroda (anoda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

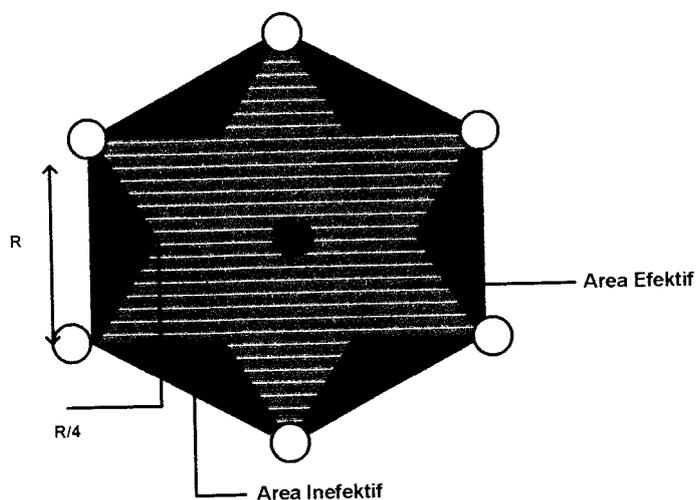
Dari data **Tabel 4.12** dapat dibuat grafik seperti **Gambar 4.22** di bawah ini :



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 $\mu\text{g/g}$.

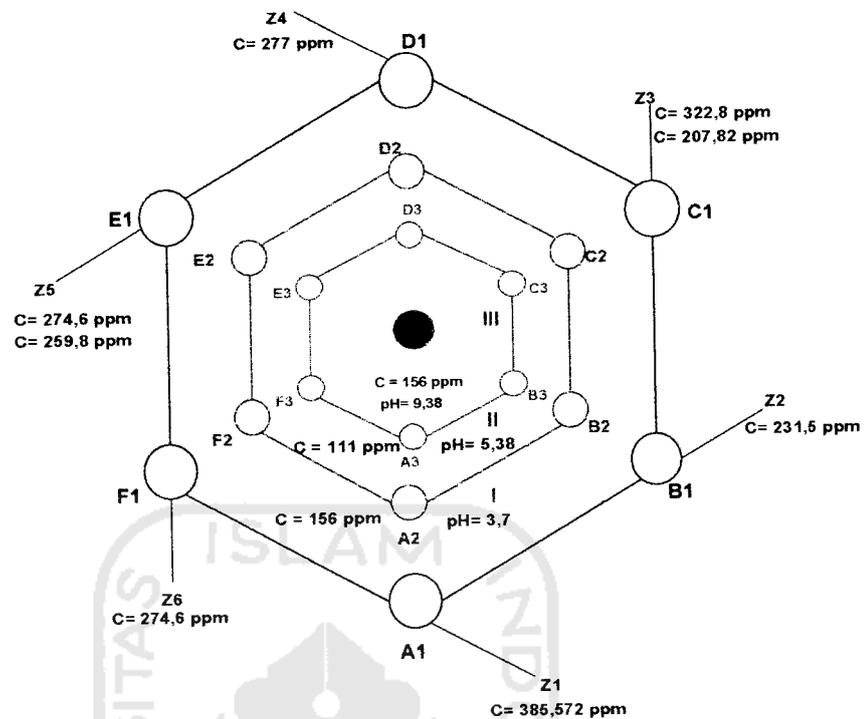
Menurut Alshawabkeh (1999), distribusi medan listrik menunjukkan area inefektif beberapa sel berbentuk *curvilinear triangle* (segitiga sama kaki) dengan badan kaki merupakan jarak elektroda yang mempunyai polaritas sama. Tinggi area segitiga ini diperkirakan tergantung pada waktu proses, spasi elektroda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

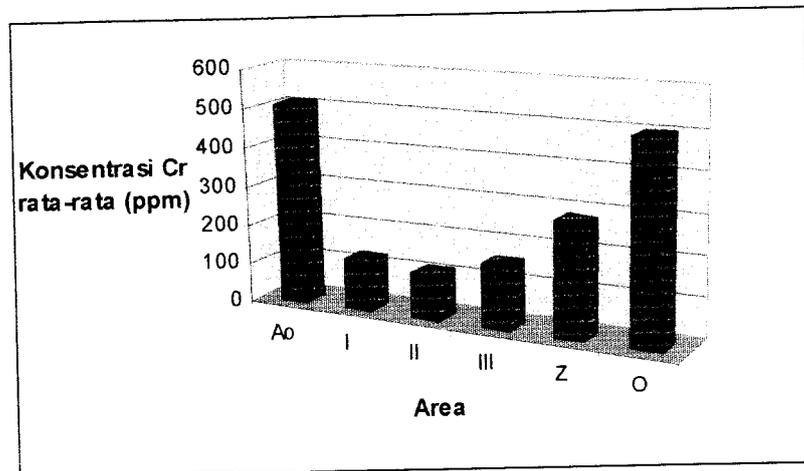
Pada penelitian ini, di analisis juga sampel tanah terkontaminasi logam berat Cr yang tidak di remediasi. Sehingga tanah terkontaminasi tersebut dibiarkan pada udara terbuka. Hasil analisis dengan metode APN menyatakan bahwa sampel tanah tersebut (O) mempunyai konsentrasi sebesar 497,324 $\mu\text{g/g}$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

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

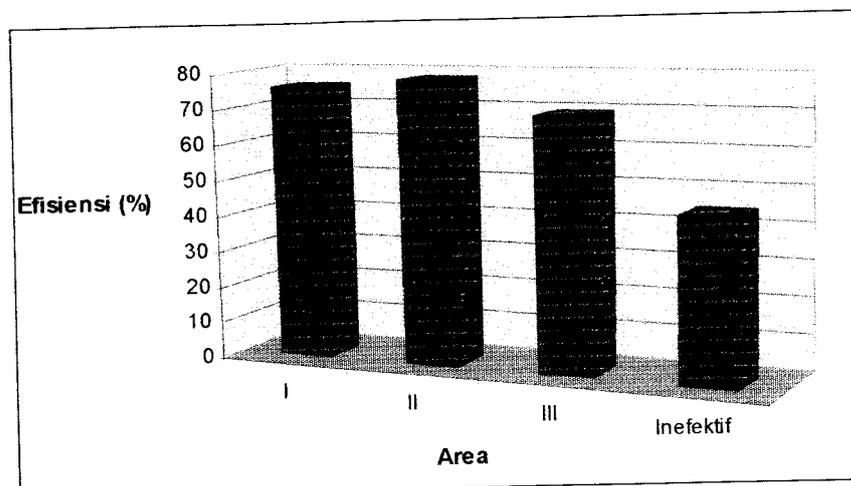
C. Nilai Efisiensi Konsentrasi Cr di Area III

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

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.

