



**PENYISIHAN Cr(VI) DENGAN PROSES ELEKTROKOAGULASI
MENGUNAKAN LOGAM Fe DAN Al**

SKRIPSI

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



ARFIAN DWI FANANI

NIM.125061100111001

LUQMAN HAKIM HARAHAP

NIM.125061107111006

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016

LEMBAR PENGESAHAN

**PENYISIHAN Cr(VI) DENGAN PROSES ELEKTROKOAGULASI
MENGUNAKAN LOGAM Fe DAN Al**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

ARFIAN DWI FANANI
NIM. 125061100111001

LUQMAN HAKIM HARAHAHAP
NIM. 125061107111006

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Ketua Program Studi Teknik Kimia

Ir. Bambang Poerwadi, MS
NIP. 19600126 198603 1 001

Dosen Pembimbing

Ir. Bambang Ismuyanto, MS
NIP. 19600504 198603 1 003

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran saya dari berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 24 Agustus 2016
Mahasiswa.



Artian Dwi Fanani
125061100111001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran saya dari berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 24 Agustus 2016

Mahasiswa.



Luqman Hakim Harahap
125061107111006



Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:

Allah SWT yang telah memberikan kemudahan atas segala kesulitan yang kami hadapi selama proses pengerjaan skripsi ini. Ayahanda dan Ibunda tercinta atas segala dukungan dan nasihat yang senantiasa membangun semangat kepada kami dan menuntun kami menjadi orang yang lebih baik dan lebih kuat.

*Kami persembahkan untuk teman seperjuangan kami,
Keluarga Besar Mahasiswa Teknik Kimia*



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami selaku penulis panjatkan kepada Allah SWT atas karunia, ridho, serta izin-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Skripsi dengan judul “PENYISIHAN Cr(VI) DENGAN PROSES ELEKTROKOAGULASI MENGGUNAKAN LOGAM Fe DAN Al” dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dorongan dari semua pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih atas segala bimbingan dan bantuan kepada:

1. Ir. Bambang Poerwadi, MS., selaku Ketua Program Studi Teknik Kimia Universitas Brawijaya.
2. Ir. Bambang Ismuyanto, MS., selaku Dosen Pembimbing I mata kuliah Skripsi Rekayasa Lingkungan di Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membimbing dan membantu kami dalam proses pelaksanaan skripsi.
3. Juliananda, ST., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing II mata kuliah Skripsi Rekayasa Lingkungan di Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membimbing dan membantu kami dalam proses pelaksanaan skripsi.
4. AS. Dwi Saptati, ST., MT. selaku Koordinator Skripsi Program Studi Teknik Kimia Universitas Brawijaya yang telah membimbing dan membantu kami dalam proses pelaksanaan skripsi.
5. Prof. Dr. Ir. Chandrawati Cahyani, MS., Rama Oktavian, ST., M. Sc., Wa Ode Cakra Nirwana, ST., MT, Vivi Nurhadianty, ST., MT, dan Diah Agustina Puspitasari, ST., MT selaku dosen program studi Teknik Kimia Universitas Brawijaya atas bekal ilmu, wawasan serta pengalaman yang diajarkan selama mengikuti perkuliahan sampai akhir penulisan skripsi.
6. Agustina Rahayu, A.Md., Evi Sulviani Nengseh, A.Md. dan Rifa Rahma, ST., selaku PLP Laboratorium Teknik Kimia yang telah membantu selama penelitian skripsi.



7. Seluruh staf Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya serta semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi.

8. Orangtua penulis dan keluarga tercinta atas segala perhatian dan kasih sayang, bantuan materi maupun non materi yang tak ternilai harganya dan doa-doa yang senantiasa dipanjatkan sehingga penyusunan laporan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

9. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Teknik Kimia yang telah membantu dan memberi semangat kepada penulis.

Penulis mengharapkan saran dari semua pihak demi kebaikan penelitian ini. Demikian laporan tugas akhir ini dibuat, semoga dapat bermanfaat bagi semua pihak dan penulis sendiri. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih

Malang, 11 Agustus 2016

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
RINGKASAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kromium.....	5
2.2 Proses Penyisihan Cr(VI).....	7
2.2.1 Metode Konvensional.....	7
2.2.2 Metode Elektrokimia.....	9
2.3 Elektrokoagulasi.....	10
2.3.1 Kelebihan dan Kekurangan.....	16
2.3.2 Reaksi EC.....	16
2.3.3 Parameter yang mempengaruhi efisiensi EC.....	19
2.3.3.1 Luas Permukaan.....	19
2.3.3.2 Waktu Elektrolisis.....	20
2.3.3.3 Kerapatan Arus.....	21
2.3.3.4 Konduktivitas Listrik Larutan.....	22
2.3.3.5 pH Larutan.....	23
2.3.3.6 Bahan Elektroda.....	24
2.3.3.7 Pengaturan Elektroda.....	24
2.3.3.8 Bentuk Elektroda.....	25
2.3.3.9 Jenis <i>Power Supply</i>	25
2.3.3.10 Jarak Antar Elektroda.....	26
2.3.3.11 Pengaruh Kecepatan Pengadukan.....	26
2.3.3.12 Konsentrasi Larutan.....	27



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sifat Fisiokimia Kromium	7
Tabel 2.2	Teknologi penyisihan Cr(VI) dengan metode konvensional	8
Tabel 2.3	Teknologi penyisihan Cr(VI) dengan metode elektrokimia	9
Tabel 2.4	Kelebihan dan kekurangan teknologi elektrokoagulasi	16
Tabel 4.1	Hasil penelitian penyisihan Cr(VI) dengan elektrokoagulasi menggunakan Al-Fe	42
Tabel 4.2	Massa pelat total awal dan setelah proses elektrokoagulasi	43
Tabel 4.3	Dimensi pelat Fe dan Al yang digunakan	46



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram Eh-pH untuk larutan mengandung Cr	6
Gambar 2.2	Proses stabilitas atau destabilitas partikel koloid	12
Gambar 2.3	Model <i>electrical double layer</i>	15
Gambar 2.4	Pengaruh pH dan konsentrasi terhadap jenis Al dan Fe	18
Gambar 2.5	Mekanisme elektrokoagulasi	19
Gambar 2.6	Jenis susunan elektroda: a) elektroda monopolar parallel, b) elektroda monopolar seri, c) elektroda bipolar	25
Gambar 2.7	Contoh elektroda <i>punched hole</i>	25
Gambar 3.1	Rangkaian alat elektrokoagulasi	33
Gambar 3.2	Diagram alir proses pembuatan limbah Cr(VI) sintetik 100ppm	36
Gambar 3.3	Diagram alir proses pembuatan rangkaian elektrokoagulasi	37
Gambar 3.4	Diagram alir proses elektrokoagulasi	38
Gambar 3.5	Diagram alir pengujian kadar Cr(VI)	39
Gambar 4.1	Pengaruh waktu terhadap %Removal Cr(VI)	44
Gambar 4.2	Pengaruh waktu terhadap perubahan konduktivitas	45
Gambar 4.3	Pengaruh luas permukaan terhadap %Removal Cr(VI)	46



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1	Perhitungan dan Data	55
Lampiran 2	Persiapan Kurva Kalibrasi	69
Lampiran 3	Dokumentasi	71
Lmpiran 4	Riwayat Hidup	77



DAFTAR SIMBOL

Besaran	Satuan dan Singkatan	Simbol
Massa	gram atau gr	M
Waktu	Menit	T
Luas Permukaan	centimeter kuadrat atau cm ²	A
Kecepatan Pengaduk	rotasi per menit atau rpm	ω
Konduktivitas	mikro siemens atau mS	K
Konsentrasi	<i>part per million</i> atau ppm	C
Volume	mililiter atau mL	V
Kuat Arus	Ampere atau A	I
Beda Potensial	Volt atau V	V



RINGKASAN

LUQMAN HAKIM HARAHP, ARFIAN DWI FANANI, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2016, *Penyisihan Cr(VI) Dengan Proses Elektrokoagulasi Menggunakan Logam Fe dan Al*, Dosen Pembimbing: Bambang Ismuyanto dan Juliananda.

Cr(VI) atau kromium heksavalen merupakan bentuk kromium yang paling berbahaya dan dapat menimbulkan efek yang merugikan bagi lingkungan, salah satu industri yang menghasilkan air limbah kromium adalah industri penyamakan kulit. Proses penyisihan Cr(VI) dapat dilakukan menggunakan metode elektrokoagulasi dengan menggunakan logam sebagai elektroda misalnya Al, Fe dan Zn, faktor yang mempengaruhi proses elektrokoagulasi salah satunya adalah pH, waktu, luas permukaan elektroda, dan konduktivitas. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pH dan waktu untuk mengetahui kondisi optimal elektrokoagulasi.

Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui waktu optimum dan mengetahui pengaruh luas permukaan elektroda dalam penyisihan Cr(VI) limbah sintetik penyamakan kulit menggunakan proses elektrokoagulasi. Elektroda yang digunakan adalah Al dan Fe. Limbah sintetik Cr(VI) dibuat dengan konsentrasi 100 ppm pada pH 2. Variabel penelitian yang digunakan adalah luas permukaan elektroda (10, 15, 20, 24 cm²) dan waktu elektrokoagulasi (5, 10, 15, 20, 25 menit). Proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan *power supply* dengan tegangan listrik sebesar 20 V dan kuat arus 5 A disertai dengan pengadukan 120 rpm. Pada setiap variabel waktu dilakukan pengambilan sampel 1 ml dan juga dilakukan pengukuran pH dan konduktivitas. Sampel yang diambil dibiarkan selama 4 jam dan dilanjutkan dengan analisa Cr(VI) menggunakan metode APHA 3500-Cr b. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh luas permukaan elektroda tidak signifikan dan pengaruh waktu signifikan pada t=0 hingga t=5 menit proses elektrokoagulasi sedangkan ketika t=10 menit hingga t=25 menit tidak signifikan dalam penyisihan Cr(VI).

Kata kunci: elektrokoagulasi, elektroda, kromium heksavalen, pH, konduktivitas,



SUMMARY

LUQMAN HAKIM HARAHAP, ARFIAN DWI FANANI, Departemen of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Brawijaya University, August 2016, *Cr(VI) Removal with Electrocoagulation Process Using Fe and Al Metal*, Lecturer: Bambang Ismuyanto and Juliananda.

Cr(VI) or hexavalent chromium is the most hazardous among the chromium species and could inflict a damage to environment, which one of the produced the chromium wastewater is the tannery industry. Cr(VI) removal process can be utilized by electrocoagulation method using metal electrode such as Al, Fe dan Zn. Several factors that affect the electrocoagulation process is pH, time, surface area of electrode, and conductivity. Advance researches are studying the pH and time effect to optimum electrocoagulation.

This research conducted to discover the optimum time and to study the effect of electrode surface area on Cr(VI) synthetic waste removal using electrocoagulation process. Al and Fe used as electrodes. Synthetic Cr(VI) waste was made into 100 ppm wastewater with pH value 2. The variables of the research are surface area (10, 15, 20, 24 cm²) and electrocoagulation time (5, 10, 15, 20, 25 minutes). Electrocoagulation process is conducted using power supply with voltage as high as 20 V and electric current 5 A with 120 rpm agitation. On each time variable, 1 ml sample was taken simultaneously with pH and conductivity measurement. The sample then left aside for four hours and analyzed the Cr(VI) residue with APHA 3500-Cr b method. This research showed that the surface area effect are not significant the electrocoagulation process on Cr(VI) removal and time effect are only significant on the electrocoagulation process between t=0 minute and t=5 minute. In the electrocoagulation process between t=10 minute to t=25 minute the effect is not significant on Cr(VI) removal.

Kata kunci: electrocoagulation, electrode, hexavalent chromium, pH, conductivity.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cr(VI) atau kromium heksavalen merupakan bentuk kromium yang paling berbahaya dan dapat menimbulkan efek yang merugikan bagi lingkungan. Keberadaan kromium di dalam air minum juga dapat menyebabkan keracunan akut dengan gejala mual, sakit perut, dan koma (Asmadi, 2009). Senyawa Cr(VI) di dalam lingkungan berasal dari limbah industri antara lain industri pelapisan logam (*electroplating*), industri cat/pigmen dan industri penyamakan kulit (*leather tanning*) (Slamet, 2003). Pada limbah cair industri penyamakan kulit mengandung logam kromium yang beragam yaitu antara 86,076 mg/L sampai 2600,97 mg/L (Wardhani, dkk., 2012) (Kusumawati, 2006). Padahal menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51/MENLH/10/1995 Tentang Baku Mutu Limbah Cair Kegiatan Industri, batas maksimal krom total (Cr) yang diperbolehkan dibuang ke lingkungan adalah 2,0 mg/L. Menurut Jin Wei, 2016 dalam jurnal yang berjudul "*Electrochemical Process for the environmental remediation of toxic Cr(VI)*" reduksi secara konvensional hanya diaplikasikan untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) yang bersifat *non-toxic*. Untuk menghilangkan Cr(VI) digunakan proses elektrokimia seperti elektrokoagulasi, elektoreduksi, elektrodialisis dan elektrodionisasi dengan keuntungan proses yang sangat sederhana, efisien, kapasitas tinggi dan biaya yang terjangkau.

Elektrokoagulasi (EC) banyak disarankan sebagai alternatif pengganti koagulasi kimia untuk menghilangkan polutan. Teknologi ini mereduksi kation logam ke air melalui elektroda logam yang terlarut sehingga menjadi kation aluminium atau besi dan hidroksida, sama seperti pada koagulasi kimia. (Vepsalainen, 2012). Pembentukan ion logam terjadi pada anoda, sedangkan pada bagian katoda terjadi pembentukan gas



2

hidrogen. Gas hidrogen membantu proses pengapungan partikel yang terflokulasi dari air. (Chen, 2003).

Penelitian penyisihan Cr(VI) melalui metode elektrokoagulasi telah dilakukan pada limbah sintesis dengan menggunakan elektroda Fe-Fe, Al-Fe, Al-Al, dan MS-ST dengan efisiensi yang beragam antara 80-100%. Parameter yang mempengaruhi efisiensi tersebut diantaranya konduktivitas, pengaturan elektroda, bentuk elektroda, tipe *power supply*, kecepatan agitasi, arus, dan pH, dan konsentrasi polutan (Heidmann, 2008; Adhoun, 2004; Keshmirizadeh, 2011; Dermentzis, 2011; Verma, 2013; Khandegar, 2013).

Penelitian yang dilakukan akan berfokus pada pengaruh luas permukaan elektroda dan waktu elektrokoagulasi terhadap efisiensi penyisihan Cr(VI). Penelitian yang dilakukan (Virma, 2011) menunjukkan bahwa penyisihan Cr(VI) dari larutan sintesis menggunakan elektrokoagulasi menunjukkan bahwa kecepatan pengadukan berpengaruh secara signifikan pada efisiensi penyisihan Cr(VI). Dengan melihat dampak waktu terhadap perubahan efisiensi, maka dapat dilihat efisiensi optimum yang dicapai untuk penyisihan Cr(VI).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh waktu pada proses elektrokoagulasi untuk penyisihan Cr(VI) dalam air?
2. Bagaimana pengaruh luas permukaan elektroda terhadap penyisihan Cr(VI) menggunakan proses elektrokoagulasi?

1.3 Pembatasan Masalah

1. Limbah yang digunakan adalah limbah sintesis menggunakan $K_2Cr_2O_7$
2. Jenis elektroda yang digunakan pada proses elektrokoagulasi adalah aluminium dan besi



3. Proses elektrokoagulasi dilakukan pada kondisi: suhu kamar dan tekanan *ambient*

1.4 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan waktu dan luas permukaan pada elektrokoagulasi yang bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh waktu terhadap penyisihan Cr(VI) dalam air,
2. Mengetahui pengaruh luas permukaan elektroda terhadap penyisihan Cr(VI) dalam air

1.5 Manfaat/Kegunaan

1. Memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai proses elektrokoagulasi.
2. Mengaplikasikan ilmu pengetahuan yang diperoleh sehingga membawa dampak yang lebih baik bagi lingkungan.
3. Sebagai referensi untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.
4. Dapat dijadikan sebagai sumber referensi mengenai penyisihan Cr(VI)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

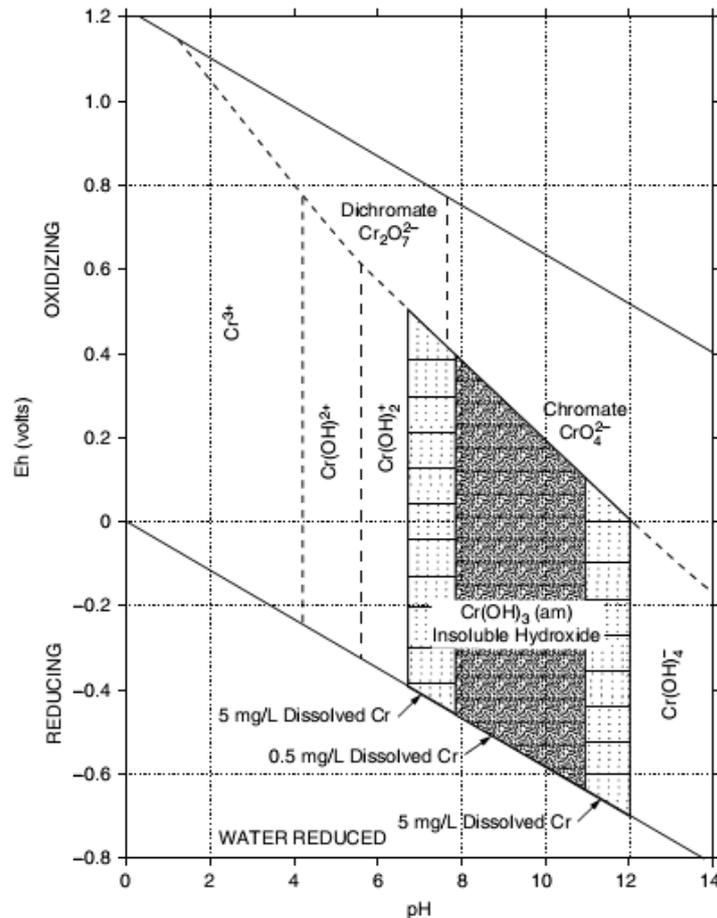
2.1 Kromium

Kromium (Cr) merupakan logam transisi yang penting; senyawanya berupa senyawa kompleks yang memiliki berbagai warna yang menarik, berkilau, titik lebur pada suhu yang tinggi serta tahan terhadap perubahan cuaca. Selain itu pelapisan logam dengan kromium menghasilkan paduan logam yang indah, keras, dan melindungi logam lain dari korosi (Poedji, 2009). Namun, kromium (Cr) juga senyawa yang dikenal memiliki daya racun yang sangat tinggi dan mempunyai respon biokimia spesifik pada organisme hidup (Asmadi, 2009).

Kromium (Cr) dapat masuk ke perairan dengan dua cara, yaitu cara alamiah dan nonalamiah. Masuknya Cr secara alamiah seperti erosi atau pengikisan pada batuan mineral dan debu-debu atau partikel Cr yang ada di udara akan dibawah turun oleh air hujan. Masuknya Cr secara non alamiah lebih berkaitan dengan aktifitas manusia seperti buangan limbah industri dan rumah tangga ke badan air (Halija, 2012). Beberapa industri yang menghasilkan limbah logam berat kromium adalah industri pelapisan logam (*electroplating*), industri cat/pigmen dan industri penyamakan kulit (*leathertanning*) (Slamet, 2003).

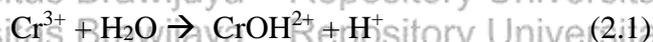
Limbah Cr menjadi populer karena sifat karsinogenik yang dimilikinya. kromium terdapat di alam dalam 2 bentuk oksida, yaitu oksida Cr(III) dan Cr(VI). Uniknya, hanya Cr(VI) yang bersifat karsinogenik sedangkan Cr(III) tidak. Tingkat toksisitas Cr(III) hanya sekitar 1/100 kalinya Cr(VI). Bahkan dari penelitian lebih lanjut, ternyata Cr(III) merupakan suatu jenis nutrisi yang dibutuhkan tubuh manusia dengan kadar sekitar 50-200 µg/hari. Cr(VI) mudah larut dalam air dan membentuk *divalent oxyanion* yaitu *chromate* (CrO_4^{2-}) dan *dichromate* ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), sedangkan Chromium trivalent/Cr(III) mudah diendapkan atau diabsorpsi oleh senyawa-senyawa organik dan anorganik pada pH netral atau alkalin (Slamet, 2003).

Besaran pH sangat mempengaruhi jenis komponen Cr yang terbentuk seperti dapat dilihat pada gambar 2.1. Kondisi pH antara 4 hingga 7,5 menyebabkan Cr^{3+} terlarut membentuk kation $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ dan $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$. Pada pH sekitar 8 akan terbentuk $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yang *insoluble* dan *amorphous*, walaupun masih terdapat sebagian $\text{Cr}(\text{III})$. Sedangkan pada pH yang lebih tinggi (di bawah pH 12 dan Eh 0), akan terbentuk $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$.



Gambar 2.1 Diagram Eh-pH untuk larutan mengandung Cr.

Pada kondisi pH rendah, Cr(III) utama yang terbentuk adalah kation Cr^{3+} dan $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$. Pada sistem Cr-H₂O pada kondisi standar, reaksi yang mempengaruhi adalah (Shaw, Duncan 1992):





Konsentrasi rata-rata kromium dalam air hujan adalah kisaran 0,2-1g/liter, konsentrasi kromium alami dalam air laut dari 0,04-0,5 mg / liter, Total kandungan kromium alami air permukaan adalah sekitar 0,5-2 mg / liter sedangkan kadar kromium yang terlarut 0,02-0,3 mg / liter dan konsentrasi kromium dalam air tanah sangat rendah (<1 mg / liter); (WHO, 2003)

Tabel 2.1. Sifat Fisiokimia Kromium

Properti	Cr	CrCl ₃	K ₂ CrO ₄	Cr ₂ O ₃	K ₂ Cr ₂ O ₇
Titik Leleh (°C)	1857	1152	968.3	2266	398
Titik didih (°C)	2672	-	-	4000	500
Solubilitas g/L	Tidak dapat dilarutkan	Sedikit bisa dilarutkan	790	Tidak dapat dilarutkan	125
Densitas (mg/L)	7.14	2.76	2.73	5.21	2.676

(WHO, 2003)

K₂Cr₂O₇ yang dilarutkan dalam air pada pH 2 menghasilkan Cr(VI). Jenis Cr(VI) yang dihasilkan menyesuaikan kondisi pH dan konsentrasi Cr(VI) dalam larutan. Pada pH kurang dari 6,5 dan konsentrasi diatas 0,03 mol/L ion kromat yang dominan adalah HCrO₄⁻, namun saat konsentrasinya kurang dari 0.001 mol/L, ion tersebut akan berubah menjadi Cr₂O₇²⁻. Larutan akan didominasi oleh Cr₂O₇²⁻ ketika konsentrasi lebih besar dari 0,03 mol/L (Palmer., 1994). HCrO₄⁻ menghasilkan larutan berwarna kuning sedangkan Cr₂O₇²⁻ menghasilkan larutan berwarna oranye (Guertin., *et al.* 2005).

2.2 Proses Penyisihan Cr(VI)

Metode penyisihan Cr(VI) dapat menggunakan 2 metode yaitu metode konvensional dan metode elektrokimia

2.2.1 Metode Konvensional

Teknik konvensional yang biasa diterapkan untuk penyisihan Cr (VI) dari limbah cair yaitu dengan pengurangan kimia Cr (VI) menjadi Cr(III) yang sifatnya *non-toxic*. Umumnya, proses konvensional ini mudah diterapkan dan efisien dalam menghilangkan Cr (VI) pada konsentrasi tinggi atau sedang. Namun, penggunaan secara terus-menerus pereduksinya (seperti FeSO₄, Na₂S₂O₅ dan SO₂) menghasilkan sejumlah

besar lumpur logam dan ini tidak efektif bila diterapkan untuk penyisihan Cr (VI). Contoh teknik konvensional seperti adsorpsi dengan adsorben karbon aktif dan zeolit secara luas digunakan untuk menghapus Cr (VI) dari perairan dan air limbah industri (Jin, 2016)

Metode biologi juga termasuk teknik konvensional untuk penyisihan Cr (VI) dengan bantuan mikroba untuk mereduksi Cr(VI), mikroba yang digunakan dapat berupa mikroba *aerobic*, *anaerobic* dan *fungi*. Pada proses ini membutuhkan pereaksi lebih sedikit dan menghasilkan lebih sedikit lumpur. Namun demikian, efisiensi untuk menghilangkan Cr(VI) pada konsentrasi tinggi dibatasi oleh lambannya degradasi biologis mikroba. Penyisihan kromium (VI) dengan proses biologi melibatkan tahap-tahap berikut: (a) pengikatan kromium ke permukaan sel, (b) translokasi dari kromium ke dalam sel, dan (c) pengurangan kromium (VI) ke kromium (III) (Carlos, 2012).

Tabel 2.2. Teknologi penyisihan Cr(VI) dengan metode konvensional

Teknologi	Operasi	Keuntungan	Kekurangan
Reduksi konvensional	Mereduksi dengan menggunakan sulfur atau komponen besi, diikuti dengan pemisahan	Mudah dioperasikan, efisien dan biaya yang terjangkau	Membutuhkan zat pereduksi yang banyak dan menghasilkan sludge
Adsorpsi	Menggunakan karbon sebagai adsorbat/penyerap	Biaya rendah, efektif, kapasitas tinggi, dan operasi yang fleksibel	Kolom adsorpsi perlu dilakukan regenerasi
<i>Ion Exchange</i>	Menggunakan penukan ion-resin	Efisien, kapaitas tinggi, dan prosesnya sangat cepat	Resin yang digunakan perlu di regenerasi.
Biodegradasi	Mereduksi dengan bantuan mikroorganisme	Mudah dioperasikan dan biaya terjangkau	Degradasi lambat, perlu memperhatikan mikroorganisme.

Proses Membran	Penukar anion dengan membran	Lebih efisien	Biaya mahal
Fotokatalisis	Mereduksi dalam semiconductor-electrolyte dengan energi yang rendah	Efisien, dapat digunakan untuk menghilangkan polutan organik dan Cr(VI)	Belum banyak digunakan oleh industri

(Jin, 2016)

2.2.2 Metode Elektrokimia

Metode elektrokimia digunakan untuk menganalisis suatu sampel dengan mengukur potensial, arus, hambatan dan menghubungkan ketiganya dengan suatu analit, sinyal yang dihasilkan berasal dari reaksi reduksi dan oksidasi yang terjadi pada permukaan elektroda, prinsip dasarnya adalah transfer elektron antara permukaan elektroda dengan molekul didalam larutan, oleh karena itu, suatu sel elektrokimia paling tidak tersusun dari dua elektroda dan larutan elektrolit (Lisa, 2012). Metode elektrokimia juga sederhana dan efisien dimana proses ini berdasarkan pada pembentukan koagulan melalui elektro-oksidasi anoda aluminium dan katoda hidrogen sehingga polutan dapat dihilangkan (Guohua, 2003). Metode elektrokimia digunakan untuk penyisihan Cr(VI) karena metode ini sangat kompatibilitas pada lingkungan terutama karena menggunakan electron sebagai reagen sehingga tidak menimbulkan polusi (Jin, 2016).

Tabel 2.3. Teknologi penyisihan Cr(VI) dengan metode elektrokimia

Teknologi	Operasi	Keuntungan	Kekurangan
Elektrokoagulasi	Reduksi katoda dan kemudian dipisahkan dengan flokulasi dengan tenaga listrik	Lebih efisien, kapasitas tinggi dan biaya terjangkau	Membutuhkan pemisahan Cr(III) yang terbentuk
Elektroreduksi	Reduksi katoda melalui jalur langsung atau tidak langsung	Lebih efisien, kapaistas tinggi dan biaya terjangkau	Membutuhkan pemisahan Cr(III) yang terbentuk

Elektrodialisis	Ion disekitar membrane di gerakan oleh muatan listrik	Kapabilitas tinggi	Biaya mahal, solubilitas yang rendah, membutuhkan energi listrik yang tinggi
Electro-electrodialysis	Perpaduan dari proses elektrodialisis dan elektrolisis	Kapasitas tinggi	Biaya mahal
Elektrodeionisasi	Perpaduan dari proses elektrodialisis dan ion exchange	Operasi dapat berjalan kontinyu tanpa meregenerasi dari resin ion exchange	Biaya mahal

(Jin, 2016)

2.3 Elektrokoagulasi (EC)

Koagulasi merupakan proses mempengaruhi stabilitas suatu koloid untuk membentuk partikel yang lebih besar atau agregat selama proses tumbukan partikel yang terdiri dari flokulasi perikinetik dan ortokinetik (Metcalf, 2003). Tujuan koagulasi adalah untuk mengatasi faktor-faktor yang menyebabkan stabilitas suspensi dalam sistem tersebut. Stabilitas yang dimaksud adalah kemampuan suatu partikel untuk tetap pada keadaan bebas dalam dispersi. Partikel yang stabil akan tetap terdispersi atau terlarut karena adanya muatan di permukaannya dan besaran derajat hidrasi (Bratby, 1980).

Flokulasi dilakukan untuk menghasilkan partikel-partikel melalui agregasi, sehingga partikel akan lebih mudah untuk dipisahkan melalui sedimentasi atau filtrasi. Pada proses flokulasi ukuran partikel akan bertambah akibat adanya tumbukan partikel. Terdapat dua jenis flokulasi, yaitu: (Metcalf, 2003)

1. Mikroflokulasi (flokulasi perikinetik), yang mana agregasi partikel dihasilkan oleh gerakan random molekul yang disebut sebagai gerakan Brownian.

2. Makroflokulasi (flokulasi orthokinetik), yang mana agregasi partikel dihasilkan dengan menerapkan gradient kecepatan dan mixing pada fluida yang mengandung partikel terflokulasi. Makroflokulasi juga dapat berarti penarikan partikel-partikel kecil oleh partikel yang lebih besar.

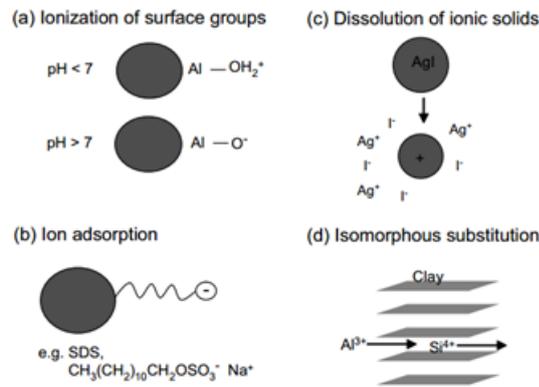
Adsorpsi merupakan hasil interaksi antar gaya tarik-menarik antara permukaan padatan berpori dan molekul komponen yang akan dihilangkan dari fase induk sehingga menghasilkan akumulasi komponen. Hal ini berbeda dengan absorpsi dimana akumulasi terjadi di dalam larutan atau padatan induk (Thomas, 1998)

Koagulan dihasilkan pada oksidasi elektrolitik dari material anoda yang sesuai pada pH yang sesuai untuk menghasilkan hidroksida metal tidak larut yang dapat menyisihkan beragam jenis polutan. Hidroksida metal tersebut menetralkan muatan elektrostatis pada padatan tersuspensi untuk memfasilitasi pengendapan atau koagulasi sehingga dapat dipisahkan dari fase aqueous (Fatih., *et al.* 2008). Hal ini menyebabkan pembentukan hidroksida metal menjadi faktor yang pening dalam penyisihan kromium.

Koloid atau larutan koloid, merupakan jenis intermediet dari suatu campuran antara larutan sebenarnya dan suspense. Ukuran partikel koloid bervariasi antara 1-1000 nm. Koloid juga termasuk system heterogen dua fase yang terdiri dari fase terdispersi dan medium pendispersi. Karena fase terdispersi pada sistem koloid terdistribusi seragam dalam media pendispersi, keadaan koloid terlihat homogeny oleh mata atau bahkan pada mikroskop biasa. Namun dengan menggunakan ultramikroskop dapat terlihat bahwa terdapat dispersi heterogen dua fase tidak larut karena pantulan cahaya partikel koloid dapat dilihat. Partikel koloid tidak dapat mengendap hanya karena gravitasi. Koloid dapat melewati kertas saring biasa namun tidak dapat melewati membran hewan; contoh larutan koloid emas (Shaw, Duncan, 1992).

Total area antar fase pada partikel koloid terdispersi sangat besar akibat ukuran makroskopiknya. Rasio area-volume menentukan properti spesifik dan sifat koloid. Dengan kata lain, ketika jumlah koloid terdispersi sangat besar, permukaan keseluruhan akan menjadi besar dan mengakibatkan interaksi kedua fase sangat penting. Karena permukaan kontak antar dua fase sangat besar, koloid sering dipelajari bersamaan dengan fenomena permukaan. Penambahan bahan pengubah aktivasi permukaan mengubah karakteristik permukaan antar fase (Shaw, Duncan, 1992).

Stabilitas atau destabilitas koloid bergantung pada muatan di permukaan partikel. Permukaan yang terlarut ke larutan akan mendapatkan muatan yang dapat diakibatkan oleh ionisasi gugus permukaan, pelarutan padatan ionic, adsorpsi ion atau substitusi isomorfus (Cosgrove, 2010).



Gambar 2.2 proses stabilitas atau destabilitas partikel koloid

- A) Ionisasi gugus permukaan: banyak permukaan yang mengandung gugus permukaan yang dapat terionisasi seperti $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ atau $-\text{NH}_2$. Muatan permukaan juga bergantung pada ionisasi gugus fungsional ini dan juga pH larutan.
- B) Pelarutan padatan ionik: Silver halida (AgI) dapat dijadikan contoh untuk mengetahui koloid bermuatan. AgI termasuk jenis garam yang larut dengan nilai $K_{\text{Sp}} = 8,5 \times 10^{-17}$. Ketika ion I^- berlebih partikel akan bermuatan negative dan ketika ion Ag^+ berlebih akan menjadikan partikel bermuatan positif.
- C) Adsorpsi ionik: contohnya terjadi pada partikel carbon black yang diadsorb oleh surfaktan anionik dapat tersuspensi di air. Hal ini yang menjadi dasar tinta, yang membutuhkan campuran surfaktan yang tepat yang dapat menjadi dispersan. Peningkatan pH dapat menghasilkan protonasi anionik yang menyebabkan destabilisasi.
- D) Substitusi Isomorfus: substitusi isomorphus terjadi apabila terdapat kisi-kisi pada kristal akibat pergantian beberapa atom kristal dengan ion lain yang memiliki jumlah elektron berbeda sehingga permukaan menjadi bermuatan, contohnya pada partikel tanah liat

Koloid dapat menjadi stabil dalam air akibat adanya gaya tolak menolak (repulsi) elektrostatis antar partikel. Pada teknik koagulasi dan flokulasi, partikel terdestabilisasi dengan penambahan bahan kimia inorganik atau organik yang

mempengaruhi sifat EDL (*Electrical Double Layer*). Koagulan merupakan bahan kimia yang mengurangi energi repulsi antar partikel (*energy barrier*) sehingga partikel dapat lebih mudah teraglomerasi karena energi potensial minimum. Flokulasi terjadi ketika partikel yang teraglomerasi saling menempel akibat adanya ikatan lemah (Crittenden., *et al.*, 2012).

Mekanisme yang dapat menyebabkan destabilisasi partikel koloid dalam air adalah (Crittenden., *et al.*, 2012) :

- a. Kompresi *double layer* elektrik. Peningkatan konsentrasi ion dalam larutan induk menyebabkan EDL terkompresi dan partikel dapat dengan mudah menjadi satu akibat jarak EDL berkurang. Destabilisasi optimum tercapai saat potensial- ζ mendekati 0 mV. Konsentrasi garam excess tidak menyebabkan restabilisasi partikel.
- b. Destabilisasi adsorpsi. Mekanisme ini terjadi ketika ion-ion atau polimer-polimer bermuatan berbeda teradsorpsi pada permukaan partikel. Komponen tersebut mengurangi muatan di permukaan dan gaya repulsi antar partikel. Destabilisasi terjadi pada potensial- ζ mendekati 0 mV. Jumlah koagulan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan restabilisasi partikel karena muatan akan berubah.
- c. Jembatan antar partikel. Koagulan logam yang terpolimerisasi atau bahan kimia organik dapat menjadi penghubung antar partikel. Polimer dapat teradsorpsi pada permukaan partikel dengan beberapa mekanisme kimia seperti interaksi antar muatan, interaksi dipol, ikatan hydrogen atau interaksi Van der Waals. Saat satu rantai polimer mengadsorpsi beberapa partikel, terjadi *bridging* dan berat molekul meningkat. *Bridging* merupakan mekanisme pembentukan polimer organik berantai panjang dengan berat molecular tinggi. Potensial- ζ partikel yang akan di destabilisasi oleh mekanisme ini tidak harus mendekati nol. Restabilisasi dapat terjadi saat permukaan tertutup sempurna oleh polimer.
- d. Presipitasi dan enmeshment. Mekanisme destabilisasi ini terjadi pada kondisi konsentrasi garam metal tinggi dan mendekati pH netral. Pada kondisi tersebut akan terbentuk produk hidrolisis yang tidak larut yang dapat terpolimerisasi. Partikel koloid dapat dijebak kedalam flok yang terbentuk. Dosis koagulan yang dibutuhkan bergantung pada jenis dan konsentrasi koloid.

Banyak permukaan yang mengandung grup fungsional yang dapat terion seperti -OH, -COOH atau -NH₂. Muatan permukaan selanjutnya bergantung pada ionisasi gugus fungsional tersebut dan bergantung pada pH larutan (Bratby, 2006). Adsorpsi dari ion-ion memiliki dampak pada muatan pada permukaan partikel. Disolusi padatan ionik dapat menyebabkan muatan pada permukaan anion dan kation terdisolusi dari solid tidak sama (Crittenden., *et al.* 2012). Ketika muatan terbentuk pada permukaan partikel maka ion-ion pada larutan induk akan terpengaruh. Ion-ion bermuatan yang berlawanan akan saling menarik dengan permukaan, sedangkan ion dengan muatan yang sama saling menolak dari permukaan. Pemisahan muatan pada permukaan partikel menghasilkan electrical double layer (EDL) seperti pada gambar (Crittenden., *et al.* 2012).

Larutan koloid, berdasarkan sifat interaksi antara fase terdispersi dan media pendispersi, diklasifikasi menjadi dua jenis, yaitu (Shaw, Duncan, 1992):

1. Koloid lipofilik: larutan koloid jenis ini memiliki afinitas yang baik terhadap pelarut yang digunakan sehingga partikel tidak akan mengendap dengan mudah dan koloid lebih stabil. Ketika media pendispersi dipisahkan dengan fase terdispersi, koloid akan mudah dicampurkan lagi dengan mixing. Jenis koloid ini termasuk jenis irreversible seperti: koloid karet, polimer pada solven organik.
2. Koloid lipofobik: jenis larutan koloid ini partikel terdispersi tidak memiliki afinitas pada medium pendispersi. Partikel koloid ini tidak stabil dan akan mudah diendapkan dengan adanya pemanasan, penambahan elektrolit, atau pengadukan. Koloid jenis ini juga tidak mudah menjadi koloid lagi dengan mixing apabila telah dipisahkan, sehingga sifatnya irreversible. Contoh koloid ini adalah koloid logam dan sol.

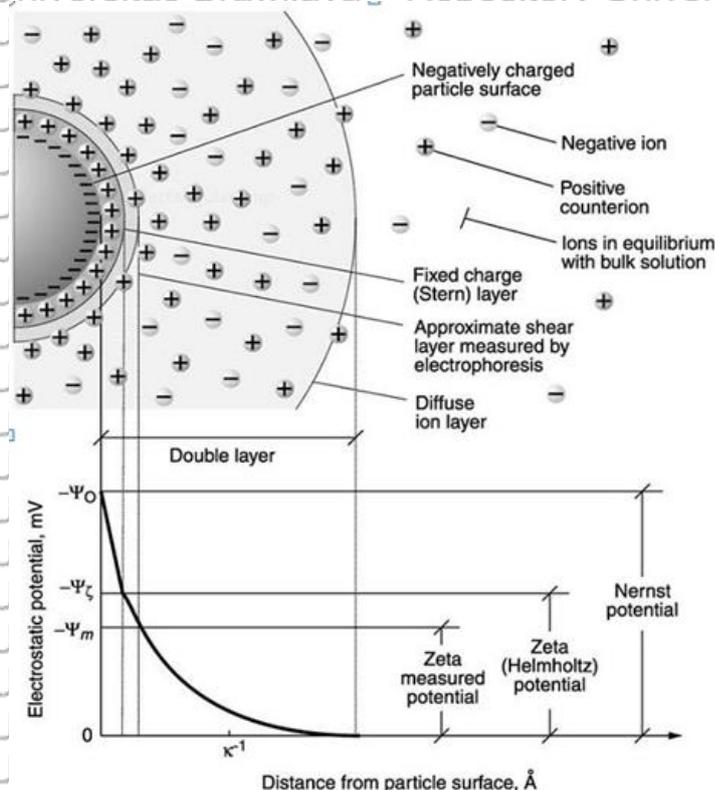
Sol merupakan dispersi partikel koloid yang mengalami gerakan Brownian dalam matriks fluida. Suspensi partikel dengan jari-jari antara 1 nm dan 1 µm disebut sebagai koloid. Partikel dengan range ukuran ini dapat dibagi menjadi tiga kategori. Partikel-partikel ini dapat berupa bagian yang saling terbagi dan menyebar di larutan (sol) atau berupa makromolekul, atau diantara keduanya. Sol dapat dikategorikan sebagai larutan lipofobik atau hidrofobik apabila digunakan solvent air.

Koloid dapat dibentuk melalui dua metode dasar, yaitu (Shaw, Duncan, 1992):



1. Metode dispersi: dimana partikel yang besar akan tereduksi menjadi lebih kecil sampai berukuran seperti koloid, contohnya pada pelarutan sol liofilik atau pembagian partikel yang besar.

2. Metode kondensasi: koloid juga dapat terbentuk dari partikel yang lebih kecil (contohnya molekul) hingga menjadi partikel koloid, seperti yang berasal dari larutan supersaturated atau sebagai produk dari suatu reaksi kimia. Reaksi kimia yang biasanya membentuk koloid diantara dispalcement, hidrolisis, atau reaksi redoks. Ketika metode kondensasi digunakan, molekul (atau ion) disimpan sebagai inti yang akan mengakibatkan nukelasi homogen atau nukleasi heterogen.



Gambar 2.3 Model *electrical double layer*

Proses elektrokoagulasi merupakan gabungan dari proses elektrokimia dan proses flokulasi-koagulasi. Kelebihan proses elektrokoagulasi untuk mengolah limbah cair adalah pada proses ini tidak ada penambahan kimia. Proses elektrokoagulasi meliputi beberapa tahap yaitu proses equalisasi, proses elektrokimia (flokulasi-koagulasi) dan proses sedimentasi. Proses equalisasi dimaksudkan untuk menyeragamkan limbah cair yang akan diolah terutama kondisi pH, pada tahap ini tidak

terjadi reaksi kimia. Pada proses elektrokimia akan terjadi pelepasan Al^{3+} dari pelat elektrode (anoda) sehingga membentuk flok $Al(OH)_3$ yang mampu mengikat kontaminan dan partikel-partikel dalam limbah (Susetyaningsih, 2008).

2.3.1 Kelebihan & kekurangan EC

Elektrokoagulasi tentunya memiliki kelebihan dan kekurangan dibanding proses lainnya. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4

Tabel 2.4. Kelebihan dan kekurangan teknologi elektrokoagulasi.

Kelebihan	Kekurangan
- EC membutuhkan peralatan sederhana dan mudah untuk dioperasikan, permasalahan yang terjadi saat proses juga mudah untuk diatasi.	-Sacrificial electrode terlarut ke dalam aliran air limbah sebagai hasil dari oksidasi dan membutuhkan penggantian secara berkala.
- Limbah yang diproses menjadi jernih, tidak berwarna dan tidak berbau.	-Penggunaan listrik bisa menjadi hal yang mahal pada beberapa tempat.
- Sludge yang terbentuk sedikit dan cenderung mudah untuk dihilangkan kandungan airnya karena terdiri dari oksida metal.	-Lapisan oksida impermeable dapat terbentuk pada katoda yang dapat menyebabkan pengurangan efisiensi pada unit EC.
- Effluent yang terbentuk mengandung TDS lebih sedikit.	-Dibutuhkan konduktifitas yang tinggi pada suspense limbah yang digunakan.
-Tidak membutuhkan penggunaan bahan kimia dan tidak perlu menetralkan kimia excess maupun terbentuknya polutan sekunder.	-Hidroksida yang bersifat seperti gelatin dapat terlarut pada beberapa kondisi tertentu.

(Sumber : Mollah, 2001:3,5)

2.3.2 Reaksi EC(Jin, 2016)

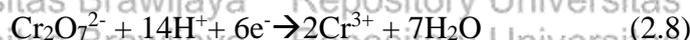
Elektrolisis berhubungan dengan banyak fenomena kimia dan fisika yang menggunakan elektroda sacrificial untuk menyediakan ion-ion ke dalam sistem polutan.

Elektrokoagulasi Cr(VI) umumnya berlangsung dalam dua tahap: (1) oksidasi Cr(VI) menjadi Cr(III) secara langsung atau tidak langsung; (2) presipitasi dan pemisahan

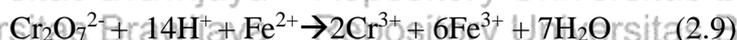
Cr(III) sebagai hidroksida. Reaksi utama yang terjadi pada anoda adalah disolusi elektroda metal dan elektrolisis air sebagai berikut (Jin, 2016):



Sedangkan untuk reaksi utama di katoda adalah elektrolisis air dan reduksi langsung Cr(VI):



Reduksi Cr(VI) langsung pada elektroda Al lebih signifikan dibandingkan pada penggunaan elektroda Fe, sedangkan Cr(VI) juga bisa direduksi dengan adanya Fe^{2+} yang terbentuk.



Saat elektrolisis, ion OH^- yang terbentuk pada katoda meningkatkan pH air limbah dan menyebabkan presipitasi Cr(III) pada bentuk hidroksidanya. Sementara itu, ion logam elektroda sakrifisial bisa bereaksi dengan H_2O atau OH^- untuk menghasilkan komponen hidroksida seperti $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang akan memfasilitasi penyisihan Cr(VI) melalui co-presipitasi atau pembentukan kromat. Mekanisme ini dijelaskan pada gambar 2.5.

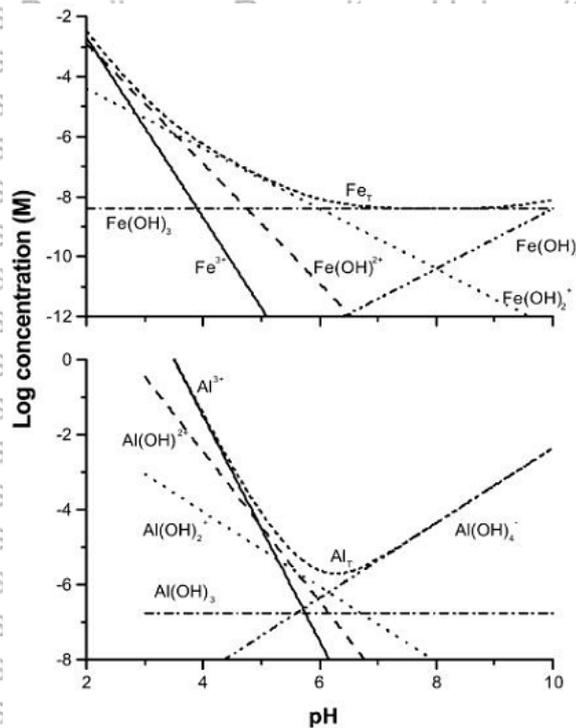
Mouedhen *et al* melaporkan bahwa pada pH dibawah 3, jumlah aluminium yang dihasilkan saat elektrolisis lebih sedikit dari pH lebih dari 3 saat jumlah densitas arus yang konstan. pH asam menyebabkan hambatan atau pengurangan laju pelarutan katoda

Beberapa penelitian menyebutkan bahwa oksigen juga terbentuk pada anoda.

Namun, hal ini tidak terjadi pada kondisi operasi yang digunakan pada elektrokoagulasi ini karena disolusi anoda mengikuti hukum Faraday (Vepsalainen, 2012).

Proses elektrokoagulasi meningkatkan pH larutan ketika digunakan pH awal dalam kondisi asam, netral atau sedikit basa dan mengurangi pH larutan saat kondisi sangat basa. Perubahan pH ini menghasilkan perbedaan jenis hidroksida aluminium yang terbentuk. Apabila pH larutan sangat asam (pH 2) alkalinitas yang dihasilkan selama proses elektrokoagulasi tidak cukup untuk meningkatkan pH larutan. Namun,

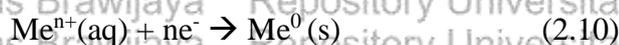
ketika pH diatas 3 dengan pH awal yang lebih tinggi, maka pH akan meningkat selama proses berlangsung. Hal ini disebabkan karena pada penurunan pH dari 3 ke 2 konsentrasi ion meningkat dengan factor 10. Saat pH awal yang digunakan basa (pH>9) maka pH akan menurun akibat terbentuk $[Al(OH)_4^-]$, yang merupakan pengonsumsi alkalinitas. Hal ini berarti laju perubahan pH dan pH steady state bergantung dari konsentrasi anion yang ada di larutan (Vepsalainen, 2012).

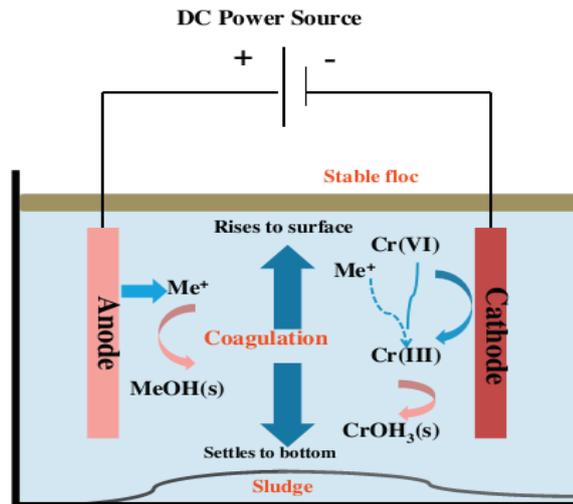


Gambar 2.4 Pengaruh pH dan konsentrasi terhadap jenis Al dan Fe

Karena reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan elektroda, konsentrasi produk reaksi paling tinggi terdapat pada permukaan elektroda dan gradient konsentrasi terjadi pada permukaan hingga ke larutan induk. Oleh karena itu, penurunan pH pada sekitar permukaan anoda dan sebaliknya pada permukaan katoda. Hal ini dapat menyebabkan presipitasi garam organik pada permukaan elektroda jika kelarutannya berubah seiring dengan pH, contohnya pengendapan kalsium karbonat pada katoda.

Jika potensial elektrokimia pada katoda pada kondisi yang tepat, reduksi elektrokimia langsung dari kation logam dapat terjadi di permukaan elektroda akibat reaksi ini (Vepsalainen, 2012):

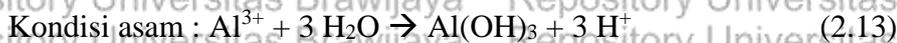




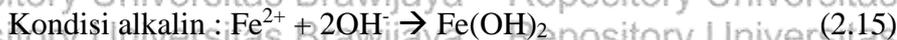
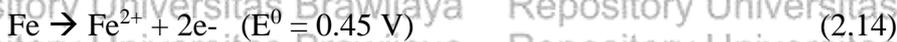
Gambar 2.5. Mekanisme elektrokoagulasi (Jin, 2016)

Reaksi yang terjadi berdasarkan jenis anoda yang digunakan (Kabuk, *et al.* 2013):

a. Reaksi yang terjadi pada elektrokoagulasi apabila digunakan elektroda Al sebagai anoda:



b. Reaksi yang terjadi pada elektrokoagulasi apabila digunakan elektroda Fe sebagai anoda:



2.3.3 Parameter yang mempengaruhi efisiensi EC

Efisiensi proses elektrokoagulasi bergantung pada banyak parameter seperti konduktivitas larutan, susunan, bentuk, dan jarak elektroda, tipe *power supply*, pH larutan, kerapatan arus, kecepatan pengadukan, waktu elektrolisis, konsentrasi polutan awal, dan waktu retensi (Khandegar, 2013).

2.3.3.1 Waktu Elektrolisis

Efisiensi penyisihan polutan dipengaruhi pula oleh fungsi waktu elektrolisis. Efisiensi akan bertambah dengan semakin banyaknya waktu elektrolisis. Namun, ketika waktu yang digunakan diatas batas optimum, maka besarnya efisiensi akan konstan.

Hidroksida logam akan terbentuk dari disolusi anoda. Pada besar kerapatan arus yang sama, jumlah hidroksida logam yang terbentuk akan sama berbanding lurus dengan waktu elektrolisis. Diatas batas optimum maka jumlah flok yang tersedia sudah menukupi untuk menghilangkan polutan.

2.3.3.2 Kerapatan Arus

Kerapatan arus merupakan parameter yang penting dalam elektrokoagulasi karena dapat menentukan dosis koagulan yang terbentuk, pembentukan gelembung, ukuran dan pertumbuhan flok, dimana ini berdampak pada efisiensi elektrokoagulasi. Penambahan kerapatan arus meningkatkan laju disolusi anoda sehingga logam hidroksida dalam larutan akan bertambah. Penambahan densitas arus yang terlalu tinggi tidak akan berpengaruh pada efisiensi karena pada larutan telah terdapat jumlah hidroksida logam yang cukup untuk proses sedimentasi polutan.

Kerapatan arus dapat diukur menggunakan persamaan (Keizmirizadeh, 2011):

$$CD = \frac{I}{A} \quad (2.1)$$

Dimana: CD = *current density*/kerapatan arus (A/m^2)

I = arus yang digunakan (A)

A = luas permukaan elektroda efektif (m^2)

Kerapatan arus berhubungan langsung dengan laju reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan elektroda. Pada penggunaan anoda besi dan aluminium, reaksi disolusi menjadi reaksi utama, dan proporsi reaksi lainnya menjadi tidak signifikan pada kerapatan arus dan potensial elektroda tertentu pada kondisi pH netral atau asam (Vepsalainen, 2012).

Koagulan yang diproduksi melalui elektrolisis dapat dihitung berdasarkan hukum Faraday ketika arus dan waktu yang digunakan diketahui. Konsentrasi koagulan yang dihasilkan dari elektrolisis pada anoda sebanding dengan arus listrik yang digunakan per volume. Disamping itu, total koagulan yang terlarut juga hasil penambahan dari disolusi elektroda pada pH rendah dan disolusi katoda aluminium. Kerapatan arus juga mempengaruhi disolusi katoda aluminium karena pengaruh laju pembentukan ion hidroksil pada katoda. Mouedhen, *et al* melaporkan hasil penilitan disolusi aluminium dimana digunakan anoda titanium plastisasi dan katoda aluminium

pada arus konstan dan perubahan kerapatan arus. Hasilnya didapatkan bahwa pengurangan kerapatan arus menyebabkan peningkatan jumlah aluminium yang larut dan seiring berjalannya waktu massa aluminium yang terlarut akan semakin besar (Vepsalainen, 2012).

2.3.3.3 Luas Permukaan

Semakin besar luas permukaan elektroda yang menyentuh elektrolit maka akan mempermudah transfer elektron dari elektrolit. Luasan yang tercelup yang lebih sedikit akan menghambat pelepasan elektron dikarenakan sedikitnya luas penampang penghantar yang menyentuh elektrolit. Hal ini menyebabkan transfer elektron lebih lambat dalam elektrolisis (Mada, 2014). Luas permukaan elektroda dapat mempengaruhi besar tegangan yang dihasilkan (Kartawidjaja *et al.*, 2008).

Pengaruh luas permukaan terhadap proses elektrolisis tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan densitas arus. Semakin besar luas permukaan maka densitas arus yang terjadi semakin kecil. Densitas arus yang semakin besar tersebut menyebabkan overpotensial (η) yang semakin besar pula. Overpotensial merupakan tambahan potensial yang dibutuhkan selain untuk memenuhi termodinamika yang dibutuhkan agar suatu reaksi bisa berjalan. Nilai overpotensial menjadi penting pada penggunaan kerapatan arus yang tinggi (Barren, 2001).

Dalam sel elektrolisis terjadi kesetimbangan ion-ion metal yang kehilangan muatan dan atom logam yang terionisasi sehingga saling meniadakan satu sama lain sehingga tidak ada perubahan dalam system. Dalam proses elektrolisis agar dapat berjalan kesetimbangan ini harus dihilangkan. Hal ini dapat dilakukan dengan memberikan potensial dari luar yang berguna agar reaksi dapat berjalan sesuai laju tertentu. Sumber potensial eksternal ini memiliki beberapa dampak pada elektroda salah satunya overpotensial (Lou., *et al.* 2006).

Overpotensial merupakan perbedaan pada potensial elektroda antara potensial saat standar dengan potensial saat operasi. Overpotensial menjadi parameter adanya energi ekstra yang dibutuhkan untuk memaksa reaksi di elektroda untuk berjalan sesuai laju reaksi yang diharapkan. Besaran overpotensial meningkat dengan bertambahnya kerapatan arus (Bard, 2001).

Overpotensi juga mempengaruhi besarnya tegangan listrik (E_{cell}) untuk kerapatan arus tertentu. Semakin besar nilai η maka potensial yang dibutuhkan agar reaksi bisa berjalan akan semakin besar (Opu, 2015).

Pemilihan elektroda yang berukuran lebih besar merupakan faktor yang penting untuk meningkatkan luas permukaan yang tumpang tindih dan jalur yang dilalui oleh arus. Namun, karena gelembung gas terakumulasi pada permukaan sel yang lebih tinggi (Mazloomi., *et al.* 2012).

Luas permukaan elektroda juga mempengaruhi resistansi listrik yang terjadi. Resistansi listrik suatu benda merupakan hasil hambatan terhadap lintasan arus listrik. Nilai resistansi berhubungan dengan luas permukaan dan panjang yang dilalui arus dan resistivitas konduksi bahan yang digunakan. Hubungan antara keduanya dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.2)$$

A adalah luas yang dilalui arus, ρ resistivitas bahan, R merupakan resistansi listrik, dan l merupakan panjang jalur. Elektron akan mulai bergerak dari permukaan elektroda melalui elektrolit dan akan berakhir hingga di permukaan elektroda (Mazloomi., *et al.* 2012).

2.3.3.4 Konduktivitas Listrik Larutan

Konduktivitas listrik merupakan sebuah kemampuan suatu bahan untuk dapat membawa arus listrik. Istilah konduktivitas juga digunakan untuk hal lain misalnya konduktivitas termal. Listrik dapat mengalir melalui suatu benda karena adanya suatu partikel yang bermuatan. Salah satu jenis larutan dengan konduktivitas tinggi adalah larutan sodium klorida (Mettler-Toledo AG, 2013).

Konduktivitas larutan sangat penting dalam proses elektrolisis karena efisiensi penyisihan polutan dan biaya operasi bergantung pada parameter ini secara langsung. Larutan harus memiliki konduktivitas minimum yang dibutuhkan agar aliran listrik dapat mengalir.

Peningkatan kerapatan arus akan bertambah seiring bertambahnya konduktivitas larutan dalam kondisi voltase yang konstan atau pada kerapatan arus yang konstan

voltase akan berkurang. Sehingga kebutuhan energi akan semakin berkurang pada konduktivitas larutan yang lebih besar. Hal ini sesuai dengan rumus berikut (Radiometer Analytical SAS, 2004):

$$K = G \cdot K = \frac{I \cdot d}{V \cdot a} \quad (2.3)$$

dimana: k = konduktivitas (S/cm)

G = konduktansi (S), dimana $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} = \frac{\text{kuat arus listrik}}{\text{tegangan listrik}}$

K = konstanta sel, dimana $K = \frac{d}{a} = \frac{\text{jarak antar elektroda}}{\text{luas permukaan elektroda efektif}}$

2.3.3.5 pH larutan

pH larutan merupakan parameter operasi yang penting untuk elektrokoagulasi. Efisiensi penyisihan polutan maksimum didapatkan pada pH larutan optimum untuk jenis polutan tertentu. Presipitasi polutan dimulai pada nilai pH tertentu. Efisiensi penyisihan polutan menurun bersamaan dengan penambahan penambahan atau pengurangan pH larutan dari optimum pH. Penelitian yang dilakukan oleh Verma (2013) menunjukkan bahwa penyisihan Cr(VI) dari larutan sintetik menggunakan elektrokoagulasi menunjukkan bahwa pH larutan berpengaruh secara signifikan pada efisiensi penyisihan Cr(VI). Eksperimen dilakukan pada pH larutan sintetik yang berbeda dan menghasilkan efisiensi maksimum pada pH 4. pH larutan sintetik setelah proses EC bertambah seiring dengan meningkatnya waktu elektrolisis akibat adanya pembentukan OH⁻ selama proses.

2.3.3.6 Bahan Elektroda

Bahan elektroda menentukan reaksi elektrokimia mana yang terjadi pada system elektrokoagulasi. Aluminium dan besi telah banyak digunakan dalam elektrokoagulasi. Aluminium mengalami disolusi sebagai Al(III) sedangkan besi dapat terlarut menjadi Fe(II) lalu teroksidasi menjadi Fe(III) apabila terdapat oksida, seperti oksigen pada konsentrasi dan pH yang sesuai. Fe(II) merupakan koagulan yang buruk dibandingkan Fe(III) karena kelarutan hidroksida dan muatan positif yang lebih rendah. Pemilihan bahan optimal bergantung pada polutan yang akan dihilangkan dan sifat kimiawi elektrolit. Secara umum, aluminium lebih baik dibanding besi apabila diinginkan

efisiensi proses yang baik walaupun bahan ini lebih mahal dari besi. Penggunaan elektroda besi maupun gabungan besi dan aluminium menghasilkan hasil yang baik untuk penghilangan kromium dari air limbah (Vepsalainen, 2012).

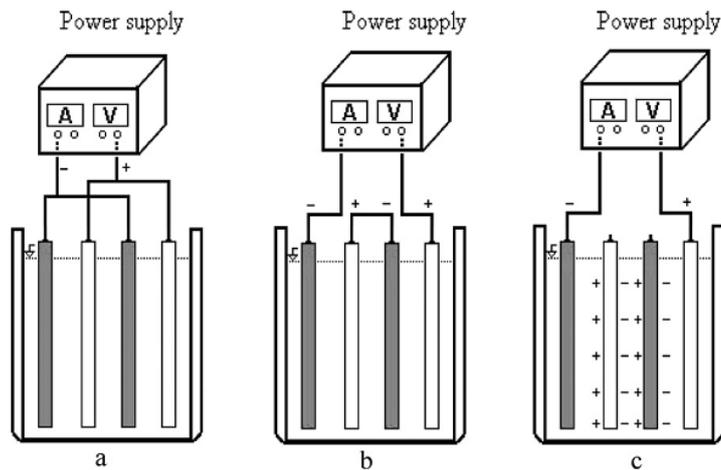
Parameter kunci dai proses elektrokoagulasi adalah pH larutan yang akan diproses. Hal ini berkaitan dengan konduktivitas larutan, pelarutan elektroda, spesiasi hidroksida yang terbentuk dan potensial- ζ partikel koloid. Kation aluminium dan besi dan hidroksidanya menyebabkan destabilisasi koloid. Jenis koagulan yang efektif terbentuk pada kondisi pH asam, netral dan sedikit basa. Pada kondisi sangat basa akan terbentuk ion $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ yang memiliki kemampuan koagulasi buruk (Vepsalainen, 2012).

Pada kondisi pH dibawah 3, laju pelepasan aluminium selama elektrolisis dengan arus konstan per volume lebih rendah daripada saat pH diatas 3. Disolusi katoda aluminium terjadi karena pH meningkat ke tingkat dimana aluminat ($\text{Al}(\text{OH})_3$) terbentuk. Larutan yang bersifat asam menghambat reaksi ini karena ion hidroksil yang terbentuk dikonsumsi oleh asam yang ada dalam larutan (Vepsalainen, 2012).

Sama seperti besi dan aluminium, kation metal lainnya yang ada dalam air dapat beraksi membentuk hidroksida. Sebagian besar hidroksida non-ionik memiliki kelarutan yang rendah di air dan dapat dihilangkan oleh presipitasi dan ko-presipitasi alam sistem elektrokoagulasi (Vepsalainen, 2012).

2.3.3.7 Pengaturan Elektroda

Bahan dan mode sambungan elektroda menjadi salah satu aspek yang penting untuk analisa biaya dalam proses elektrokoagulas. Kobya, *et al* (2011) meneliti bahwa pada air limbah tekstil dan perbandingan kinerja berbagai variasi sambungan dengan variable pH, kerapatan arus dan waktu operasi.



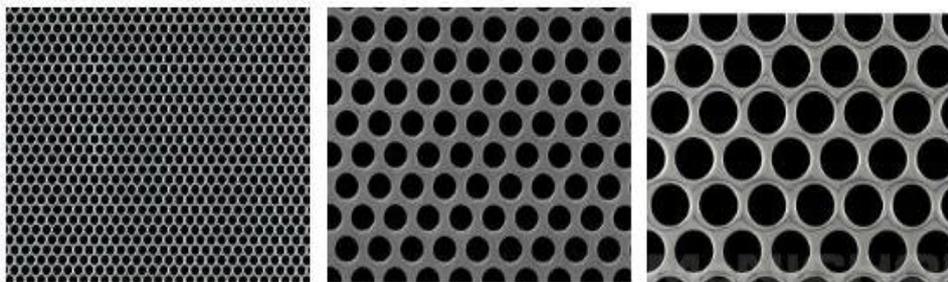
Gambar 2.6. Jenis susunan elektroda: a) elektroda monopolar paralel, b) elektroda monopolar seri, c) elektroda bipolar (Koby, *et al.*, 2011)

Elektroda monopolar yang disusun paralel (gambar a): anoda dan katoda dihubungkan paralel yang mana arus dibagi ke semua elektroda. Susunan ini membutuhkan potensial listrik yang lebih rendah dibandingkan dengan susunan seri (gambar b). Sedangkan pada jenis susunan bipolar (gambar c), dimana elektroda terluar terhubung pada power supply dan tidak ada hubungan listrik untuk elektroda dalam.

Sehingga yang paling rendah potensialnya adalah yang ditunjukkan pada gambar a.

2.3.3.8 Bentuk Elektroda

Bentuk elektroda mempengaruhi efisiensi penyisihan polutan pada proses elektrokoagulasi. Jenis elektroda *punched hole* (gambar 2.3) memiliki efisiensi lebih tinggi daripada elektroda datar (*plane*). Hal ini disebabkan oleh intensitas medan listrik pada ujung jenis elektroda tersebut lebih besar (1.2 kali) dibandingkan tipe *plane*.



Gambar 2.7. Contoh elektroda *punched hole*.

2.3.3.9 Jenis Power Supply

Pada proses elektrokoagulasi, terjadi pembentukan ion hidroksida logam secara in-situ akibat oksidasi elektrolitik dari anoda sacrificial. Ion tersebut berfungsi sebagai koagulan dan menghilangkan polutan dari larutan secara sedimentasi. Penelitian yang telah dilakukan umumnya menggunakan arus DC dalam proses elektrokoagulasi. Penggunaan arus DC mengakibatkan pembentukan korosi pada anoda akibat oksidasi. Lapisan oksidasi tersebut juga menyebabkan pengurangan aliran arus antara katoda dan anoda, hal ini menyebabkan efisiensi penyisihan polutan menjadi berkurang.

Vasudevan *et al* (2011) memelajari tentang efek penggunaan arus AC dan DC pada penyisihan cadmium dari air menggunakan anoda dan katoda aluminium. Percobaan tersebut menghasilkan efisiensi penyisihan sebesar 97,5 dan 96,2% dengan konsumsi energi 0,454 dan 1,002 kWh/kL dengan kerapatan arus 0.2 A/dm^2 dan pH 7 untuk AC dan DC. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembentukan korosi pada elektroda dapat dikurangi dengan menggunakan arus AC untuk menggantikan DC.

2.3.3.10 Jarak antar elektroda

Jarak antar elektroda memiliki peran yang signifikan terhadap elektrokoagulasi karena medan elektrostatis bergantung pada jarak kedua anoda. Efisiensi penyisihan polutan maksimal dapat dicapai pada jarak optimum anoda dan katoda. Pada jarak antar elektroda minimum, efisiensi penyisihan polutan semakin kecil. Hal ini disebabkan hidroksida logam menjadi flok dan polutan yang telah terdepositasi akan terdegradasi akibat tumbukan akibat gaya tarik elektrostatis (Daneshvar *et al*. 2004). Efisiensi penyisihan polutan akan bertambah seiring dengan peningkatan jarak antar elektroda dari titik minimum ke optimum. Peningkatan tersebut akibat adanya penurunan efek elektrostatis sehingga dibutuhkan ion yang lebih sedikit untuk koagulasi polutan.

2.3.3.11 Pengaruh Kecepatan Pengadukan

Pengadukan akan membantu menjaga keseragaman kondisi di dalam sel elektrolisis sehingga tidak terjadi gradient. Agitasi dalam sel elektrolisis memberikan kecepatan pergerakan ion yang terbentuk. Dengan penambahan kecepatan pengadukan hingga ke kecepatan optimum agitasi, terjadi peningkatan efisiensi penyisihan polutan. Peningkatan mobilitas ion dalam larutan akan menyebabkan flok terbentuk lebih cepat

sehingga waktu yang dibutuhkan akan lebih sedikit. Peningkatan kecepatan agitasi diatas titik optimum maka efisiensi akan menurun karena tumbukan antar flok lebih besar sehingga akan terdegradasi (Modirshahla *et al.*, 2008).

2.3.3.12 Konsentrasi Larutan

Efisiensi penyisihan polutan akan menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi awal polutan pada kerapatan arus yang konstan. Hal ini disebabkan oleh pembentukan flok hidroksida metal yang belum mencukupi untuk mengendapkan sejumlah konsentrasi molekul polutan yang ada di dalam larutan (Kobyas *et al.*, 2006a; Daneshvar *et al.*, 2006).

2.3.3.13 Waktu Pendiaman

Sampel yang telah melalui proses elektrokoagulasi selama waktu tertentu, selanjutnya akan didiamkan untuk periode waktu tertentu (waktu pendiaman) agar terjadi pengendapan dari komponen yang terkoagulasi. Peningkatan waktu pendiaman akan meningkatkan efisiensi penyisihan polutan. Peningkatan ini diakibatkan oleh semakin lama dibiarkan, maka semua senyawa yang terkoagulasi akan mengendap lebih mudah menghasilkan dua fase, yaitu larutan jernih dan sludge. Namun, ketika waktu pendiaman ditambah diatas waktu optimum, sludge akan terdesorpsi kembali ke larutan menyebabkan penurunan efisiensi penyisihan polutan.

2.3.3.14 Pasivasi Elektroda

Pasivasi elektroda merupakan akumulasi lapisan penghambat (biasanya anoda) pada permukaan elektroda. Pasivasi tidak diharapkan untuk terjadi pada elektrokoagulasi karena akan meningkatkan resistansi dan mencegah perpindahan arus efektif antar anoda. Hal ini dapat meningkatkan potensial sel, namun tidak berpengaruh pada produksi gelembung atau koagulan. Penggunaan *deionized water* dan membersihkan elektroda secara berkala dapat menghilangkan semua bahan yang menyebabkan pasivasi dan meminimalisir pasivasi.

2.3.3.15 Konsentrasi Anion

Konsentrasi anion pada larutan mempengaruhi kestabilan lapisan pasif dari elektroda aluminium. Pada beberapa penelitian ditambahkan garam sebagai supporting electrolites untuk mengetahui dampaknya pada efisiensi. Garam yang digunakan



diantaranya NaCl , Na_2SO_4 , NH_4Cl and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Hasilnya didapatkan bahwa anion sulfat meningkatkan konsumsi listrik dan memiliki dampak negative pada efisiensi elektrokoagulasi. Rasio $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ harus mencapai 0,1 atau lebih untuk memastikan pemecahan lapisan pasif. Konsentrasi ion Cl^- optimum diketahui sebesar 61 mg/L. Selain itu, beberapa garam juga dapat mengendap pada katoda jika konsentrasi garam-garaman dalam air cukup tinggi. Lapisan isolasi tersebut menyebabkan konsumsi listrik meningkat secara signifikan (Vepsalainen, 2012).

2.3.3.16 Temperatur

Pengaruh temperatur terhadap penyisihan polutan telah dilakukan pada beberapa penelitian. Kesimpulan yang bias diambil dari beberapa penelitian tersebut adalah bahwa pada temperatur rendah disolusi anoda terjadi secara lambat. Namun, belum ada penelitian yang menghubungkan dengan jumlah katoda yang terlarut. Sedangkan apabila suhu terlalu tinggi, terjadi pengecilan pori gel $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang menyebabkan pembentukan flok yang padat yang akan terdeposit pada permukaan elektroda. Peningkatan temperatur juga akan meningkatkan kelarutan aluminium. Jadi, peningkatan suhu dapat menyebabkan efek positif maupun negative terhadap efisiensi penyisihan yang bergantung pada mekanisme penyisihan polutan (Vepsalainen, 2012).

2.3.4 Elektroda Hibrid Al-Fe

Besi dan aluminium merupakan elektroda sacrificial yang telah berhasil dan efektif dalam penyisihan polutan. Aluminium merupakan material yang mudah didapatkan dan tidak berbahaya. Aluminium adalah anoda yang memiliki keunggulan seperti memiliki daya hantar listrik baik, ketahanan karat yang tinggi, tidak magnetis dan reflektor panas dan gelombang elektromagnetis yang baik (Siring, 2012).

Jenis elektroda hybrid dapat dipadukan rasio Fe dan Al. Berdasarkan penelitian Aoudj, *et al* (2015) menggunakan variasi rasio Fe-Al untuk mereduksi fosfat dan $\text{Cr}(\text{VI})$, didapatkan hasil terbaik pada rasio 100% elektroda Fe dengan residu 18.17 dan 0,008 mg/L. Sedangkan rasio 2Al-2Fe didapatkan hasil 8.9 dan 0.039 mg/L. Hasil tersebut menunjukkan walaupun pada 100% Fe dihasilkan penyisihan $\text{Cr}(\text{VI})$ yang baik, namun kurang efektif untuk menghilangkan fosfat.

2.4 Analisa kadar Cr(VI)

Pengukuran kadar kromium pada sampel air bertujuan untuk mengetahui kadar kromium dalam sampel yang dapat ditentukan dengan metode spektrofotometri UV-Vis, beberapa metode untuk penentuan logam dalam air diantaranya metode APHA (*America Public Helath Association*), metode tersebut merupakan metode standar yang banyak digunakan dalam penentuan logam, salah satu metode APHA untuk pengujian logam Cr adalah APHA 3500-Cr, prinsipnya adalah menambahkan suatu pengompleks diphenylcarbazon pada pH asam sehingga akan memeberikan warna violet yang kemudian dilakukan pengukuran dengan spektrofotometer UV-Vis, intensitas warna yang terbentuk dipengaruhi oleh kadar Cr, waktu, pH dan volume pengompleks.

Pada pengujian Cr(VI) secara kuantitatif dapat dilakukan dengan metode kolometri yaitu mereaksikannya dengan diphenylcarbazon dalam larutan asam. Cr(VI) dalam sampel akan tereduksi dan hasil reaksi menghasilkan suatu kompleks berwarna violet. (APHA, 1999)

2.5 Penelitian Terdahulu

Keshmirizadeh, *et al* (2011) dalam "*An investigation on the new operational parameter effective in Cr (VI) removal efficiency: a study on electrocoagulation by alternating pulse current*" melakukan penelitian dengan menggunakan sample sintetik dengan melarutkan $K_2Cr_2O_7$. Elektrokoagulasi dilakukan pada reaktor yang diletakkan diatas *magnetic stirrer* dengan menggunakan elektroda Al-Fe, sedangkan pada power source ditambahkan generator APC (*Alternating Pulse Current*). Perobaan menghasilkan bahwa dengan menggunakan APC didapatkan waktu elektrolisis yang lebih cepat yaitu sebesar 5-12%.

Penelitian oleh Aoudj, *et al* (2015) dilakukan menggunakan proses batch dengan anoda Al-Fe. Reaktor yang digunakan terbuat dari kaca dengan dimensi 15x13x12 cm, dengan jarak antar elektroda 1 cm yang memiliki luas area tenggelam sebesar 100 cm², serta menggunakan arus DC. Penelitian ini menyimpulkan bahwa elektroda *hybrid* Al-Fe menunjukkan hasil yang baik dibandingkan elektroda Al saja yaitu menghasilkan sisa residu Cr(VI) 0,039 mg/L.

Penelitian oleh Yehia A. El-Taweel, *et al* (2015) melakukan penyisihan Cr(VI) menggunakan proses elektrokoagulasi pada reaktor batch berpengaduk, elektroda yang

digunakan berbentuk batang dengan panjang 15 cm, elektroda diberi jarak 0,87 cm serta menggunakan arus DC (20 V, 5 A). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) dan pH, hasilnya konsentrasi residu kromium yang dihasilkan meningkat ketika konsentrasi awal meningkat serta meningkat dengan bertambahnya pH dan arus yang diberikan.





BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian kuantitatif. Metode kuantitatif dimana data yang diambil dari hasil eksperimen dengan variabel-variabel yang ditentukan, berupa data kuantitatif (data yang berbentuk angka atau data yang diangkakan) untuk membandingkan variasi perlakuan dan memperoleh penyisihan Cr(VI) dengan proses elektrokoagulasi.

3.2 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Kegiatan penelitian skripsi ini dilaksanakan di Laboratorium Sains Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Kegiatan ini dilaksanakan pada April sampai Mei 2016.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel bebas

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Variasi luas permukaan elektroda, 10 cm²; 15 cm²; 20 cm², dan 24 cm².
2. Variasi waktu proses elektrokoagulasi, 5 menit; 10 menit; 15 menit; 20 menit; dan 25 menit.

3.3.2 Variabel kontrol

Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Suhu atmosfer (suhu kamar)
2. Tekanan *ambient*
3. Konsentrasi Cr dalam larutan limbah 100 ppm

4. pH larutan 2
5. Konduktivitas elektrik larutan $4,2615 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
6. Volume adalah 100 ml
7. Tegangan listrik 20 V
8. Pelat yang digunakan Fe dan Al
9. Jarak antar pelat 1 cm
10. Arus listrik 5 A

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian elektrokoagulasi Cr(VI) ini yaitu: *power supply*, voltmeter, pH meter, spektrofotometer UV-Vis, *magnetic stirrer*, tachometer, *conductivitymeter* dan peralatan kaca. Power supply yang digunakan akan menjadi sumber arus listrik ke elektroda Al-Fe yang diletakkan dalam sel elektrolisis dari beaker glass 1000 mL. Voltmeter dan pH meter digunakan untuk menguji variabel kontrol yang telah ditetapkan untuk proses elektrokoagulasi. Hasil elektrokoagulasi tersebut selanjutnya dianalisa menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Peralatan kaca lainnya berfungsi sebagai pendukung untuk pengambilan, penuangan dan penyimpanan bahan.

3.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan antara lain: pelat Fe, pelat Al, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ *pro analyst* (Merck KGaa), pengompleks *diphenylcarbazone* (Merck Kгаа), HCl 0,1M, H_3PO_4 , dan *deionized water*. Pelat Fe dan Al digunakan sebagai elektroda dengan luas permukaan bervariasi 10, 15, 20 dan 24 cm^2 .

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Proses Pembuatan Limbah Sintetik Cr(VI) 100 ppm

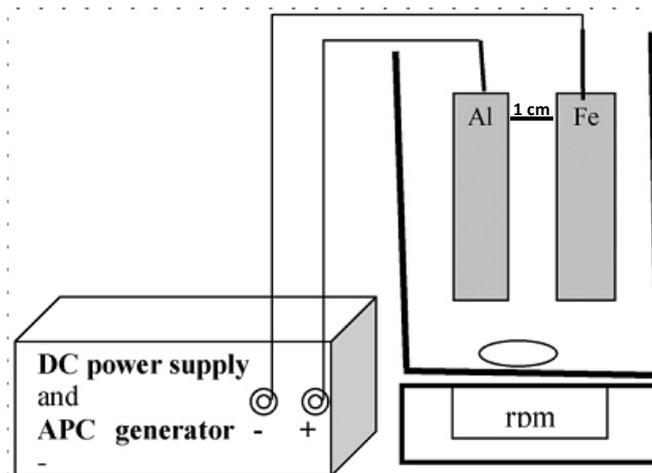
Proses pembuatan limbah sintetik Cr(VI) 100 ppm sebagai sampel limbah kromium yang akan dielektrokoagulasi pada penelitian adalah sebagai berikut:

1. Deionized water ditambahkan larutan HCl 0,1 M sampai pH menjadi 2
2. $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7(\text{s})$ ditimbang sebanyak 136,2 mg.
3. $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7(\text{s})$ dilarutkan dalam deionized water pH 2.
4. Larutan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ diencerkan menggunakan deionized water pH 2 hingga mencapai volume 1000 mL.

3.5.2 Perangkaian Sistem Elektrokoagulasi

Perangkaian sistem elektrokoagulasi adalah sebagai berikut:

1. Pelat besi dan aluminium dipotong menjadi masing-masing ukuran 3x4 cm., 2,5 x 4 cm., 2,5 x 3 cm dan 2,5 x 2 cm menggunakan alat pemotong.
2. Pelat besi dan aluminium disambungkan ke power supply menggunakan penjepit listrik.
3. Jarak antar pelat besi diatur sejauh 1 cm menggunakan penyangga (statif).



Gambar 3.1. Rangkaian alat elektrokoagulasi.

3.5.3 Prosedur Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi pada penelitian ini sebagai berikut:

1. 100 mL larutan $K_2Cr_2O_7$ 100 ppm (pH 2) dituang ke dalam beaker glass.
2. Pelat logam berukuran 2,5 x 4 cm dimasukkan ke dalam larutan $K_2Cr_2O_7$.
3. Power supply dihidupkan dengan voltase 20 V dan arus listrik 5 A dengan pengadukan 120 rpm.
4. Pengambilan sampel 1 ml dan dilakukan pengukuran pH dan konduktivitas tiap 5 menit sampai dengan 25 menit.
5. Sampel yang diambil dilakukan pendiaman sampai 4 jam.
6. Proses 1-5 diulangi dengan elektroda berukuran 3 x 4 cm, 2,5 x 3 cm dan 2,5 x 2 cm.

3.5.4 Analisa Kadar Cr(VI)

Sampel hasil elektrokoagulasi dianalisis menggunakan metode APHA 3500-Cr b (diphenylcarbazide) untuk menentukan kandungan Cr(VI). Prinsipnya adalah menambahkan suatu pengompleks diphenylcarbazon pada pH asam sehingga akan memberikan warna violet.

0,5 ml sampel diencerkan sampai volume menjadi 50 ml, kemudian ditambahkan 3 tetes asam fosfat (H_3PO_4) dan 1 ml diphenylcarbazon sebagai pengompleks sehingga warna sampel menjadi violet, setelah itu sampel dimasukkan kedalam kuvet untuk dilakukan pengujian menggunakan spektrofotometer Uv-Vis, $\lambda=540$ nm. Data yang dihasilkan berdasarkan metode ini adalah konsentrasi Cr yang merujuk pada kurva standar.

Konsentrasi Cr dijadikan dasar untuk menghitung kadar Cr(VI) yang sebenarnya. Cr(VI) yang dijadikan rujukan adalah Cr_2O_7 , sehingga rumus yang digunakan adalah:

$$\text{Konsentrasi Cr(VI)} = \frac{Mr Cr_{207}}{2 \cdot Ar Cr} \times \text{konsentrasi Cr} \quad (3.1)$$

3.5.5 Pengukuran pH larutan

pH dari larutan sampel dilakukan menggunakan perangkat pH-meter Schott Instrumen dengan ketelitian alat ± 0.01 . Pengukuran pH dilakukan setiap variabel waktu (5, 10, 15, 20, dan 25 menit).

3.5.6 Pengukuran Konduktivitas

Konduktivitas diukur menggunakan perangkat conductivity meter CT Lutron dengan ketelitian ± 0.001 mS. Pengukuran konduktivitas dilakukan untuk setiap variabel waktu bersamaan dengan pengukuran pH larutan.

3.5.7 Analisa BNT (Beda Nyata terkecil)

Uji BNT (Beda Nyata terkecil) atau yang lebih dikenal sebagai uji LSD (*Least Significance Different*) adalah sebagai acuan dalam menentukan rata-rata dua perlakuan berbeda secara statistik atau tidak.

Untuk menghitung nilai BNT atau LSD, kita membutuhkan beberapa data yang berasal dari perhitungan sidik ragam (ANOVA) yang telah dilakukan sebelumnya, data tersebut berupa MSE dan dfe. Selain itu juga butuh tabel t-student. Secara lengkap rumusnya adalah sbb:

$$BNT_{\alpha} = (t_{\alpha, dfe}) \cdot \sqrt{\frac{2(MSE)}{r}} \quad (3.2)$$

Dimana:

BNT_{α} = Beda Nyata terkecil

MSE = Mean Square Error

$t_{\alpha/df}$ = Nilai tabel untuk derajat bebas galat pada taraf sebesar α (95%)

r = banyaknya replikasi atau variasi setiap perubahan

Nilai BNT (LSD) inilah yang menjadi pembeda antar rata-rata dua populasi sampel, bila rata-rata dua populasi sampel lebih kecil atau sama dengan nilai LSD, maka dinyatakan tidak berbeda signifikan. Atau dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$|X_1 - X_2| \leq LSD\alpha = \text{Tidak Berbeda Signifikan} \quad (3.3)$$

dimana

x = Nilai rata-rata tiap perlakuan

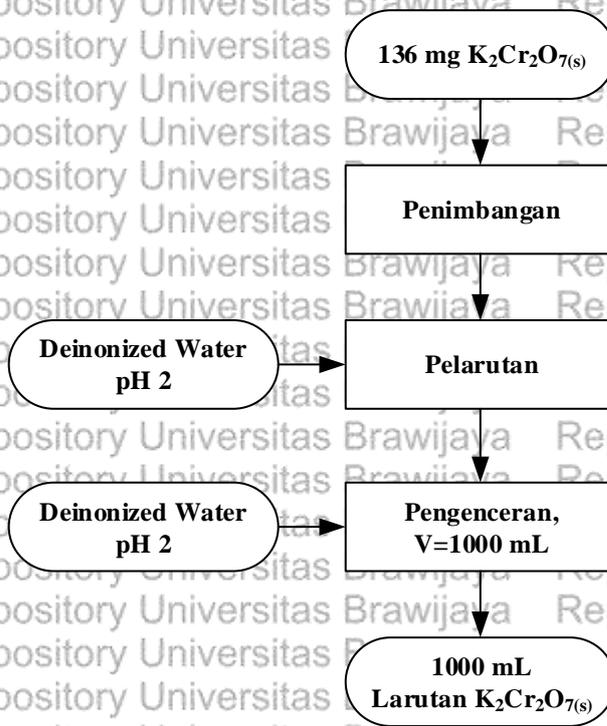
Jika nilai $x_1 - x_2$ lebih kecil daripada nilai BNT nya maka kenaikan atau penurunan data tidak berbeda signifikan, apabila nilai $x_1 - x_2$ lebih besar dari pada BNT maka kenaikan atau penurunan data terjadi berbeda signifikan. Pada penelitian ini digunakan nilai α sebesar 0,95.

3.5.8 Pengukuran perubahan massa plat

Perubahan massa diukur menggunakan perangkat neraca analitik Kern dengan ketelitian ± 0.0001 gram. Pengukuran massa plat dilakukan sebelum dan sesudah elektrokoagulasi. Perubahan massa diukur dengan mengurangi massa plat sebelum dielektrokoagulasi dengan massa plat setelah elektrokoagulasi.

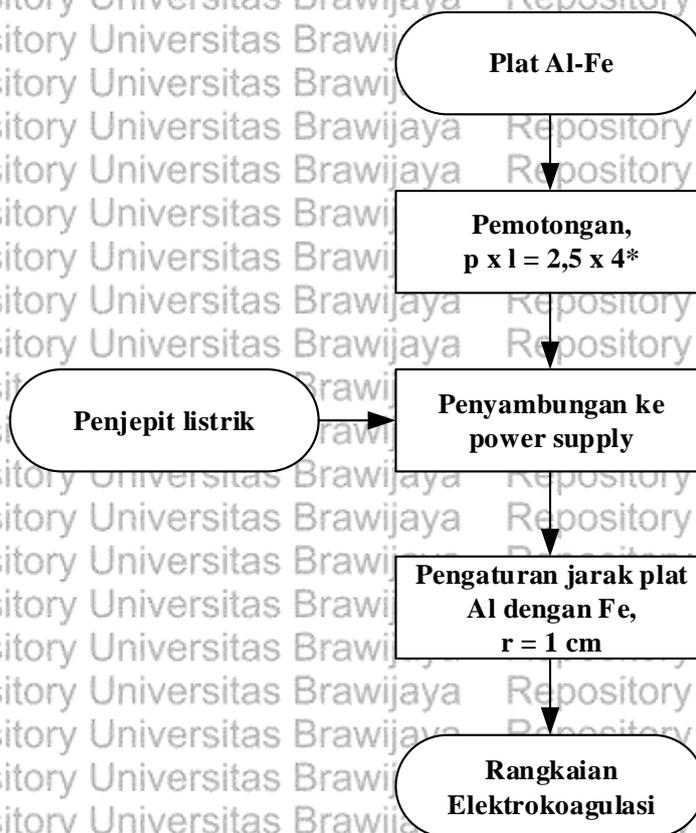
3.6 Diagram Alir Penelitian

3.6.1 Proses Pembuatan Limbah Sintetik



Gambar 3.2. Diagram alir proses pembuatan limbah Cr(VI) sintetik

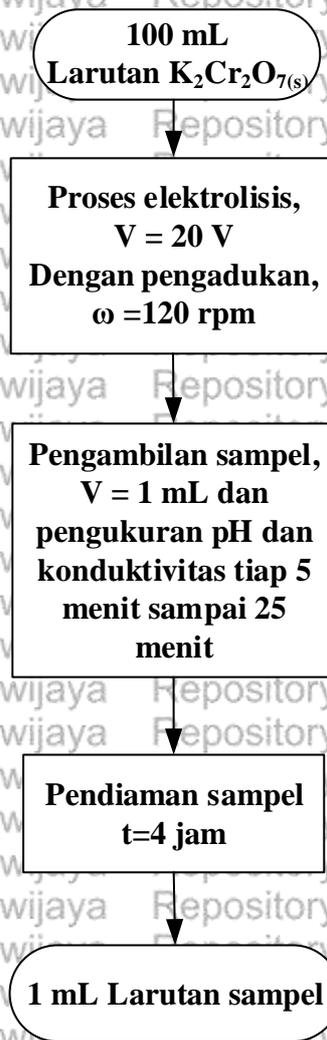
3.6.2 Perangkaian Sistem Elektrokoagulasi



*diulangi untuk ukuran pelat 3 x 4 cm, 2,5 x 3 cm dan 2,5 x 2 cm

Gambar 3.3. Diagram alir proses pembuatan rangkaian elektrokoagulasi.

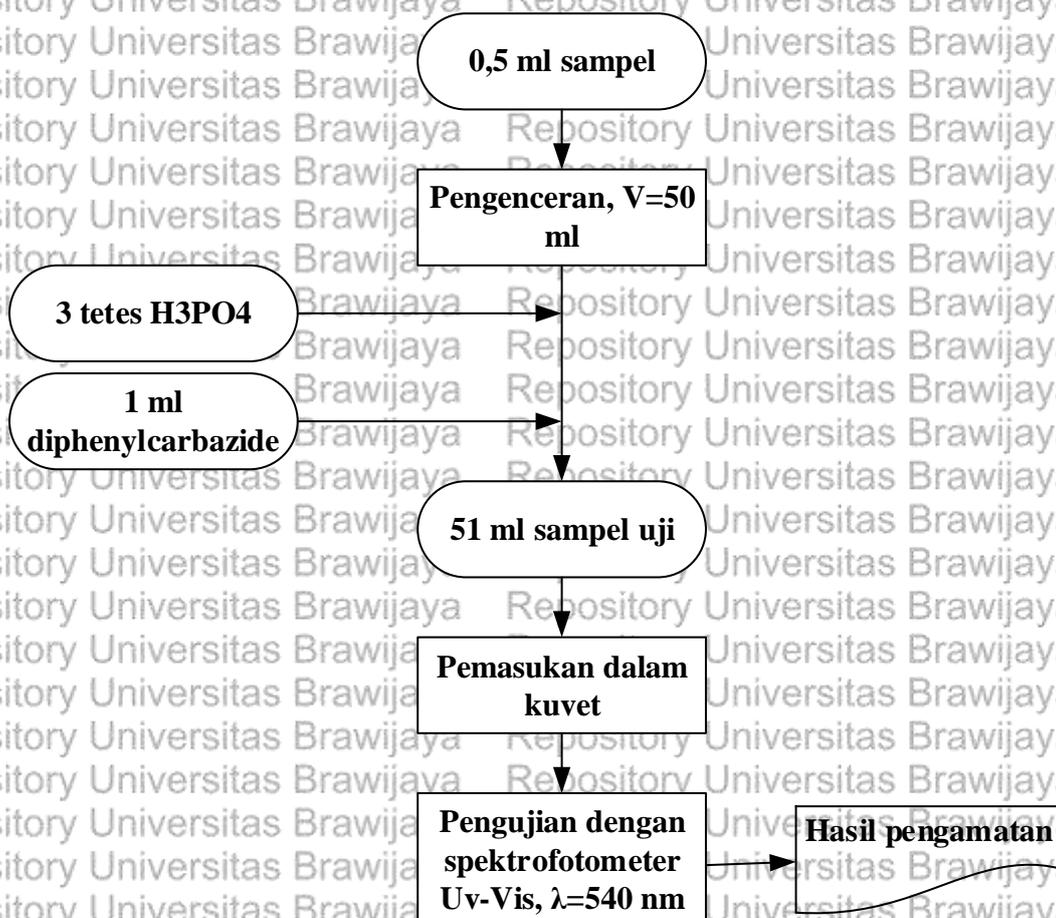
3.6.3 Prosedur Elektrokoagulasi



**semua langkah diulang untuk pelat 3 x 4 cm, 2,5 x 3 cm dan 2,5 x 2 cm)*

Gambar 3.4. Diagram alir proses elektrokoagulasi.

3.6.4 Analisa Kadar Cr(VI)



Gambar 3.5. Diagram alir pengujian kadar Cr(VI)



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penyisihan Kadar Kromat Menggunakan Proses Elektrokoagulasi dengan Logam Fe-Al

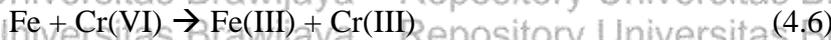
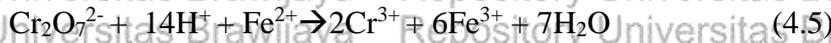
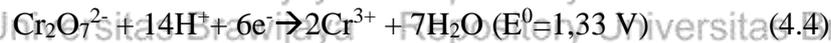
Sampel yang digunakan memiliki konduktivitas sebesar ± 4 mS dan pH 2 yang dipengaruhi oleh kadar H^+ dalam larutan. Kandungan ion lainnya dalam larutan hanya terlarut dalam jumlah kecil, sehingga konduktivitas tersebut hanya dipengaruhi oleh adanya ion H^+ di dalam air yang memiliki konduktansi ekuivalen sebesar $349,8 S.cm^2/mol$ (Mettler, 2013).

Proses elektrokoagulasi menghasilkan endapan dalam larutan yang merupakan hasil disolusi elektroda aluminium. Produk disolusi aluminium tersebut dapat menjadi adsorben untuk menyisihkan kromium dalam air. Reaksi pembentukan adsorben yang terjadi di dalam larutan, yaitu:



Disolusi anoda Al dalam proses elektrolisis (reaksi 4.1) pada pH rendah dapat menghasilkan Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, dan $Al(OH)_2^+$. Produk ini selanjutnya dapat terpolimerisasi menjadi $Al_n(OH)_{3n}$ sesuai reaksi (4.2)-(4.3). Hasilnya berupa komponen bermuatan yang dapat menghilangkan Cr(VI) dengan adsorpsi di permukaan flok atau dengan *enmeshment precipitation* selama proses elektrokoagulasi (Keizmirzadeh, 2011).

Reaksi lain yang terjadi di dalam larutan adalah reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). Penyisihan Cr(VI) dapat pula terjadi dengan mekanisme reduksi seperti pada reaksi (3.4)-(3.6) berikut (Aoudj, 2015):

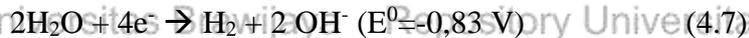


Mekanisme reaksi (4.4) menunjukkan reaksi reduksi langsung yang terjadi pada katoda. Laju reaksi ini dipengaruhi oleh adanya reduksi atau hidrolisis air. Hidrolisis air lebih dimungkinkan terjadi karena potensial reduksi yang lebih tinggi. Reaksi (4.5) dan (4.6) tidak dapat terjadi dalam penelitian ini karena reaksi tersebut terjadi pada saat Fe digunakan sebagai anoda. Ion Cr(III) dari reaksi (4.4) selanjutnya dapat mengendap menjadi $\text{Cr(OH)}_3(\text{s})$ pada kondisi pH yang sesuai yaitu pada pH 5 (Xu, *et al.* 2014).

Pada penelitian ini pH akhir yang dihasilkan pH antara 3,73-4,2. Sehingga belum mencapai pH yang cukup untuk mencapai kondisi sesuai untuk membentuk Cr(OH)_3 dan hanya terbentuk Cr(III) yang larut. Hasil ini menunjukkan kromium dalam *sludge* hanya kromium yang teradsorpsi oleh hidroksida aluminium.

Selama proses elektrokoagulasi terjadi perubahan pH dan konduktivitas larutan.

Hal ini terjadi karena hidrolisis air di katoda berdasarkan reaksi berikut:



Reaksi hidrolisis 3.7 yang terjadi selama elektrolisis menghasilkan sejumlah besar H_2 dan OH^- . H_2 yang terbentuk akan terlepas ke udara sedangkan OH^- akan tetap berada di larutan sehingga pH akan semakin meningkat sedangkan konduktivitasnya berkurang.

Hasil penelitian pengaruh luas permukaan elektroda dan waktu terhadap penyisihan Cr(VI), perubahan pH dan konduktivitas pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil penelitian penyisihan Cr(VI) dengan elektrokoagulasi menggunakan Al-Fe.

No	Luas Permukaan (cm ²)	Waktu (menit)	pH	Konduktivitas (mS)	Penyisihan Cr(VI) (%)	Perubahan Massa Al (gram)
1	10	0	2	4	0	0
		5	3,73	1,162	15,885	0,010
		10	3,96	1,141	38,938	0,032
		15	4,08	1,1	44,546	0,035
		20	4,14	1,092	46,831	0,047

2	15	25	4,17	1,085	50,777	0,052
		0	2	4	0,000	0
		5	4,04	1,143	37,485	0,016
		10	4,05	1,139	45,169	0,037
		15	4,09	1,087	46,831	0,050
		20	4,15	1,028	51,192	0,059
		25	4,18	1,022	52,438	0,075
3	20	0	2	4	0,000	0
		5	4,05	1,138	38,938	0,032
		10	4,07	1,112	50,777	0,042
		15	4,12	1,051	53,477	0,052
		20	4,16	1,001	54,100	0,064
		25	4,19	0,992	57,423	0,080
		0	2	4	0,000	0
4	24	5	4,06	1,12	51,815	0,032
		10	4,07	1,093	54,100	0,049
		15	4,12	1,02	54,308	0,053
		20	4,18	0,992	55,554	0,068
		25	4,2	0,973	59,5	0,082
		0	2	4	0,000	0

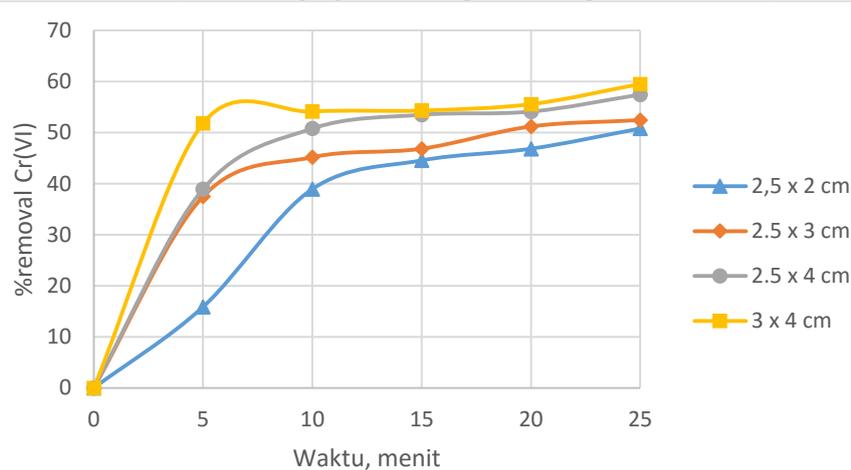
Tabel 4.2 Massa pelat total awal dan setelah proses elektrokoagulasi

No	Luas Permukaan (cm ²)	Massa pelat Fe (gram)		Δ Massa Pelat Fe (gram)	Massa pelat Al (gram)		Δ Massa Pelat Al (gram)
		Awal	Akhir		Awal	Akhir	
1	10	5,603	5,603	0,001	1,145	1,093	0,052
2	15	9,179	9,179	0,000	3,396	3,321	0,075
3	20	12,877	12,877	0,001	3,548	3,468	0,080
4	24	11,785	11,785	0,001	3,614	3,532	0,082

4.2 Pengaruh waktu elektrokoagulasi terhadap penyisihan Cr(VI)

Waktu mempengaruhi efektivitas proses elektrokoagulasi. Jumlah arus listrik yang digunakan untuk proses elektrokoagulasi akan semakin banyak apabila proses tersebut prosesnya semakin lama. Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk proses elektrokoagulasi perlu diteliti sebagai acuan efisiensi proses dalam penyisihan Cr(VI).

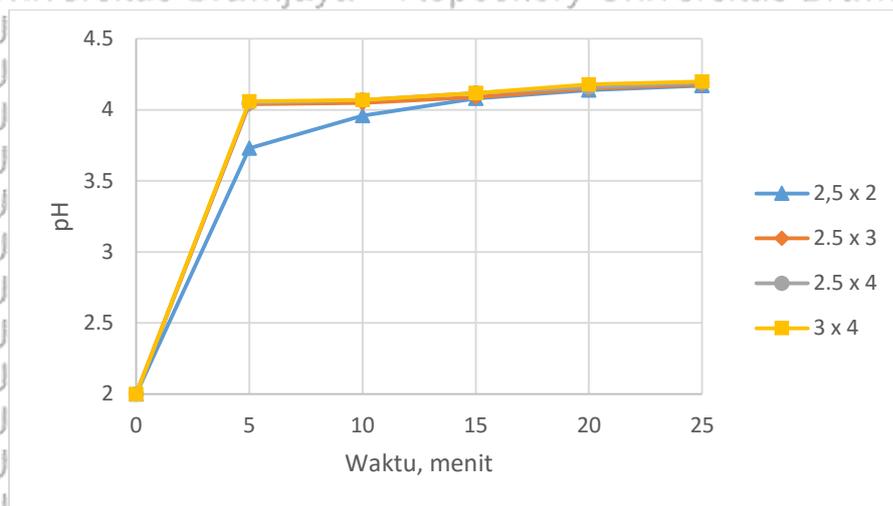
Data hubungan waktu dan efisiensi penyisihan Cr(VI) yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pengaruh waktu terhadap %removal Cr(VI) untuk setiap pelat

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa semakin lama proses elektrokoagulasi akan meningkatkan jumlah Cr(VI) yang tersisihkan. Pembacaan BNt (Beda Nyata Terkecil) untuk data pengaruh %removal Cr(VI) terhadap waktu didapatkan bahwa beda nyata hanya terjadi antara menit ke nol dengan menit ke 5 dengan besaran 36,03%. Sedangkan antara waktu antara 10 hingga 25 menit, perubahan yang terjadi tidak signifikan. Hal ini menunjukkan terjadi perubahan yang signifikan pada awal proses, yaitu dari menit ke 0 hingga menit ke 5.

Pada $t=5$ menit terjadi peningkatan antara 15,89%, 37,49%, 38,94% dan 51,82% untuk masing-masing luas permukaan. Berdasarkan hasil analisa BNt didapatkan bahwa terjadi perubahan yang signifikan untuk analisa data pengaruh waktu terhadap pH sebesar 1,97 dari $t=0$ hingga $t=5$ menit. Gambar 4.2 menunjukkan perubahan pH berdasarkan waktu elektrokoagulasi. Kedua gambar ini menunjukkan bahwa laju penurunan pH berbanding lurus dengan peningkatan %removal Cr(VI) pada menit ke 0 hingga ke 5.



Gambar 4.2 Pengaruh waktu terhadap pH larutan untuk setiap pelat

pH berhubungan dengan laju reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan elektroda dan juga mempengaruhi potensial elektroda, yang menunjukkan bahwa reaksi terjadi pada permukaan elektroda. Pada penggunaan anoda aluminium, reaksi disolusi menjadi reaksi utama (Vepsalainen, 2012). Apabila kadar H^+ berkurang maka nilai konduktivitas menurun (pH meningkat) sehingga laju reaksi juga akan menurun. Penurunan konduktivitas disebabkan terjadinya reaksi hidrolisis air dalam larutan yang menyebabkan kadar ion H^+ semakin berkurang. Walaupun terjadi pembentukan ion OH^- yang dapat meningkatkan nilai konduktivitas, namun ion tersebut bereaksi dengan ion logam yang larut dalam air untuk membentuk hidroksida logam (Bazrafshan, 2006., Keizmirizadeh., *et al.* 2011)

Ketika waktu $t = 10$ ke $t = 25$ menit terjadi peningkatan %removal $Cr(VI)$ namun tidak signifikan. Penyisihan $Cr(VI)$ dari $t=10$ sampai $t=25$ menit. Hal ini dipengaruhi oleh massa Al yang terdisolusi di dalam larutan. Berdasarkan analisa BNT untuk data hubungan waktu dan perubahan massa Al (lampiran) didapatkan bahwa data yang menghasilkan beda signifikan adalah selisih antara data pada menit ke nol dengan menit ke 10, 15, 20 dan 25, sedangkan antara menit ke nol hingga menit ke 5 perubahan yang terjadi tidak signifikan.

Pada waktu proses elektrokoagulasi diatas 5 menit, perubahan signifikan dihasilkan, antara $t=5$ menit ke $t=20-25$ menit dan $t=10$ ke $t=25$ menit. Hal ini menunjukkan bahwa hingga menit ke 25 masih terjadi peningkatan perubahan massa Al terlarut signifikan. Hubungan ini dapat dijelaskan pada persamaan dalam hukum I dan

II Faraday tentang elektrolisis yang menyatakan bahwa suatu komponen yang terdeposisi atau terdisolusi berbanding lurus dengan jumlah listrik yang melewati suatu sel dan massa molekul relatif sel komponen tersebut (Jensen, 2012). Faktor lain yang mungkin berpengaruh adalah kemampuan ion Cr(VI) diadsorp dan muatan di permukaan $\text{Al}(\text{OH})_3$ karena adanya peningkatan pH larutan dapat menurunkan kemampuan adsorpsi Cr(VI) (Crittenden, 2012; Guertin, 2005). Hal ini yang menyebabkan pengaruh massa elektroda Al terdisolusi tidak terlalu berpengaruh terhadap %removal Cr(VI).

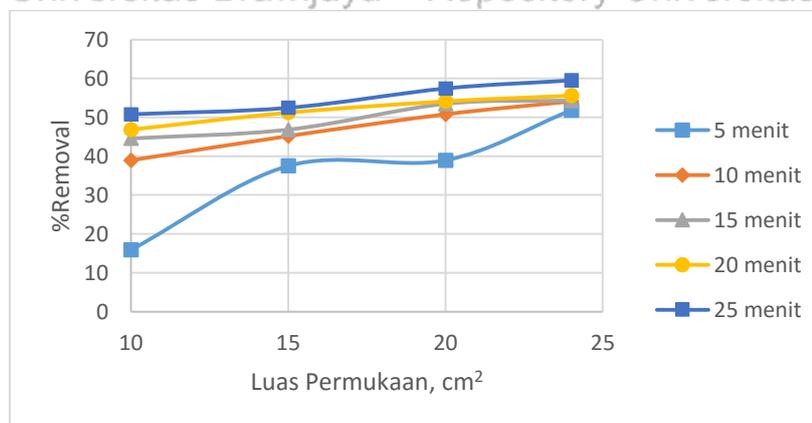
4.3 Pengaruh Ukuran Elektroda terhadap Penyisihan Cr(VI)

Luas permukaan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari empat jenis ukuran elektroda, masing-masing pelat digunakan untuk jangka waktu maksimal 25 menit dengan pengambilan sampel setiap 5 menit mulai dari $t=0$ menit.

Tabel 4.3 Dimensi pelat Fe dan Al yang digunakan

Ukuran Pelat (tinggi x lebar)	Luas Permukaan (cm^2)
2,5 x 2	10
2,5 x 3	15
2,5 x 4	20
3 x 4	24

Proses elektrokoagulasi terhadap ukuran elektroda yang berbeda menghasilkan beberapa interpretasi data seperti pada Gambar 4.3 dan 4.4



Gambar 4. 3 Pengaruh luas permukaan terhadap %Removal Cr(VI)

Pengaruh luas permukaan %Removal Cr(VI) dalam larutan induk dimana %Removal adalah jumlah Cr(VI) yang berhasil disisihkan dari larutan, sehingga efisiensi proses elektrokoagulasi dapat diketahui. Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa luas permukaan yang semakin bertambah akan meningkatkan efisiensi penyisihan kromium walaupun tidak signifikan, dimana penyisihan kromium tertinggi dihasilkan pada luas permukaan elektroda 24 cm^2 dengan waktu elektrokoagulasi 25 menit sebesar 59,5%.

Berdasarkan analisa BNT, didapatkan bahwa penyisihan %removal Cr(VI) hanya dihasilkan beda signifikan antara penggunaan luas permukaan elektroda 10 cm^2 dengan 20 cm^2 dan 10 cm^2 dengan 24 cm^2 dimana dihasilkan beda signifikan 9,62 dan 13,05. Hasil ini menunjukkan bahwa faktor luas permukaan yang dihasilkan tidak berpengaruh signifikan terhadap penyisihan Cr(VI). Penggunaan luas permukaan elektroda yang lebih besar tetap lebih diutamakan karena pengaruhnya terhadap tegangan yang dihasilkan (Kartawidjaja *et al.*, 2008). Semakin besar luas permukaan elektroda yang menyentuh elektrolit maka akan mempermudah transfer elektron dari elektrolit. Luasan yang tercelup yang lebih sedikit akan menghambat pelepasan elektron dikarenakan sedikitnya luas penampang penghantar yang menyentuh elektrolit. Hal ini menyebabkan transfer elektron lebih lambat dalam elektrolisis (Mada, 2014).



BAB V KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian elektrokoagulasi limbah Cr(VI) penyamakan kulit menggunakan elektroda Al dan Fe dengan variasi waktu elektrokoagulasi dan luas permukaan elektroda menunjukkan bahwa:

1. Waktu proses elektrokoagulasi mempengaruhi %removal Cr(VI) antara menit ke 0 sampai menit ke 5. Proses elektrokoagulasi antara menit ke 10 hingga menit ke 25 tidak menunjukkan perubahan %removal Cr(VI) yang signifikan.
2. Luas permukaan elektroda tidak menjadi faktor utama dalam penyisihan Cr(VI) karena penurunan penyisihan Cr(VI) tidak signifikan.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk peneliti selanjutnya dalam mengembangkan penelitian ini adalah:

1. Perlu dilakukan peninjauan lebih lanjut mengenai efek waktu pendiaman sampel untuk analisa kadar Cr(VI).
2. Perlu dilakukan peninjauan kembali mengenai pengaturan konduktivitas larutan, sebaiknya perlu ditambahkan NaCl dengan massa tertentu dalam mengatur konduktivitas larutan.
3. Perlu dilakukan peninjauan kembali mengenai waktu proses elektrokoagulasi.
4. Perlu dilakukan peninjauan kembali mengenai kuat arus listrik, sebaiknya kuat arus listrik perlu dikaji terlebih dahulu sebelum melakukan proses elektrokoagulasi.
5. Perlu dilakukan pengukuran kandungan elektrolit dan *sludge* yang dihasilkan dari proses elektrokoagulasi untuk mengetahui kinetika reaksi dalam larutan.



DAFTAR PUSTAKA

- Adhoum, Nafaa., Monser, Lotfi., Bellakhal, Nizar., Belgaied, Jamel-Eddine. 2004. *Treatment of Electropelating Wastewater Containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by Electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. CXII: 207-213.*
- Aoudj, S., A, Khelifa, A., Drouiche, N., Belkada, R., Miroud, D. 2015. *Simultaneous Removal of Chromium(VI) and Fluoride by Electrocoagulation–Electroflotation. Application of a Hybrid Fe-Al Anode. Chemical Engineering Journal. CCLXVII: 153-162.*
- Asmadi, Endro S, W Oktiawan. 2009. *Pengurangan (Cr) dalam Limbah Cair Industri Kulit pada Proses Tannery Menggunakan Senyawa Alkali Ca(OH)_2 dan NaHCO_3 (Studi Kasus PT. Trimulyo Kencana Mas Semarang). IPB: Bogor.*
- Barrera-Diaz, Carlos, dkk. 2012. *A Riview of Chemical, Electrochemical and Biological Methods for Aqueous Cr (VI) Reduction. Journal of Hazadous Materials. CXXIII-CXXIV: 1-12*
- Bratby, John. 1980. *Coagulation and Flocculation with an Emphasis and Wastewater Treatment.* Croydon: Uplands Press Publication.
- Bugis, Halija. 2012. *Studi Kandungan Logam Berat Kromium VI (Cr(VI)) pada Air dan Sedimen Disungai Pangkajene Kabupaten Pangkep.* Makasar: UNHAS.
- Chen, Guohua. 2004. *Electrochemical Technologies in Watewater Treatment. Separation and Purification Technology. XXXVIII:11-41*
- Cosgrove, Terence. 2010. *Colloid Science : Principles, Methods and Applications, 2nd edition.* Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Crittenden, John C., Trussell, R Rhodes., Hand, David W., Howe, Kerry J., Tchobanoglous, George. 2012. *MWH's Water Treatment Principles and Design, Third edition.* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., Djafarzadeh, N., 2006. *Decolorization of Basic Dye Solutions by Electrocoagulation: An Investigation of the Effect of Parameters. Journal of Hazardous Materials Operational*. BCXXIX: 116-122.

Daneshvar, N., Sorkhabi, H.A., Kasiri, M.B., 2004. *Decolorization of Dye Solution Containing Acid Red 14 by Electrocoagulation with a Comparative Investigation of Different Electrode Connections. Journal Of Hazardous Materials*. BCXII: 55-62.

Fitriani, Lisa. 2012. *Studi Reaksi Reduksi CO₂ dengan Metode Elektrokimia Menggunakan Elektroda Cu*. Depok: UI

Heidmann, Ilona., Calmano, Wolfgang. 2008. *Removal of Cr(VI) from Model Wastewaters by Electrocoagulation with Fe Electrodes. Journal of Separation and Purification Technology*. LXI: 15-21.

Guertin, Jacques., Jacobs, James A., Avakin, Cynthia P. 2005. *Chromium (VI) Handbook*. Florida: CRC Press.

Ilhan, Fatih., Kurt, Ugur., Apaydin, Omer., Gonullu, M. Talha. 2008. *Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes*, *Journal of hazardous materials*, 154:381-389. Istanbul: Yildiz Technical University.

Jin Wei., Hao Du., Shili Zheng., Yi Zhang., 2016. *Electrochemical Processes for the Environmental Remediation of Toxic Cr(VI): A Review. Electrochimica Acta*. CLXXXI (MMXVI):1044-1055

Kabuk, Harun Akif., Ilhan, Fatih., Avsar, Yasar., Kurt, Ugur., Apaydin, Omer., Gonullu, Mustafa T. 2013. *Investigation of Leachate Treatment with Electrocoagulation and Optimization by Response Surface Methodology*. *Clean – Soil, Air, Water*, 41:1-7. Weinheim: Wiley-VCH GmbH & Co.

Keshmirizadeh, Elham., Yousefi, Somayeh., Rofouei, Mohammad Kazem. 2011. *An Investigation on the New Operational Parameter Effective in Cr(VI) Removal Efficiency: A Study on Electrocoagulation by Alternating Pulse Current. Journal of Hazardous Materials*. CLXXX: 119-124.



Khandegar, V., Saroha, Anil K. 2013. *Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluente A Review. Journal of Environmental Management.* CXXVIII:949-963.

Kobyas, M., Demirbas, E., Ulu, F. 2016. *Evaluation of Operating Parameters with Respect to Charge Loading on the Removal Efficiency of Arsenic from Potable Water by Electrocoagulation. Journal of Environmental Chemical Engineering.* Accepted Manuscript.

Kobyas, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydinler, C., Demirbas, E. 2006. *Journal of Desalination.* CLXXX:201

Kobyas, Mehmet., Ulu, Feride., Gebologlu, Ugur., Demirbas, Erhan., Oncel, Mehmet S. 2011. *Treatment of Potable Water Containing Low Concentration of Arsenic with Electrocoagulation: Different Connection Modes and Fe-Al Electrodes. Jurnal of Separation and Purification Technology.* LXXVII: 283-293.

Mettler Toledo. 2013. *A Guide to Conductivity Measurement Theory and Practice of Conductivity Applications.* Schwerzenbach: Mettler-Toledo AG, Analytical.

Modirshahla, N., Behnajady, M.A., Mohammadi-Aghdam, S., 2008. *Investigation of the Effect of Different Electrodes and Their Connections on the Removal Efficiency of 4-Nitrophenol from Aqueous Solution by Electrocoagulation. Journal Of Hazardous Material.* CLIV: 778-786.

Mollah, M. Yousuf A., Schennach, Robert., Parga, Jose R., Cocke, David L. 2001. *Electrocoagulation (EC) — Science and Applications. Journal of Hazardous Materials.* BLXXXIV: 29-41.

Reddithota, Daniel., Yerramilli, Anjaneyulu., Krupadam, Reddithota J. 2007. *Electrocoagulation: A Cleaner method for treatment of Cr(VI) from electropelating industrial effluents, Indian Journal of Chemical Technology, vol. 14:240-245.*

Siring, Elfrida., RIngo. 2012. *Menggunakan Metode Elektrokoagulasi pada Pengolahan Limbah Industri Penyamakan Kulit menggunakan Alumunium sebagai Sacrificial Electrode.* Depok: Universitas Pendidikan Indonesia.

Slamet. 2003. *Pengolahan Limbah Logam Berat Chromium (VI) dengan Fotokatalis TiO₂.*



Depok: UI.

Susetyaningsih, Retno, Kismolo, Endro., Prayitno, 2008. *Kajian Proses Elektrokoagulasi untuk Pengolahan Limbah Cair*. Makalah dalam Seminar Nasional HIV/SDM Teknologi Nuklir. Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN. Yogyakarta, 25-26 Agustus 2008.

Thomas, W John., Crittenden, Barry. 1998. *Adsorption Technology & Design*. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books.

Vasudevan, Subramanyan., Lakshmi, Jothinathan., Sozhan, Ganapathy. 2011. *Effects of Alternating and Direct Current in Electrocoagulation Process on the Removal of Cadmium from Water*. Karaikudi: Central Electrochemical Research Institute.

Vepsalainen, Mikko. 2012. *Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters*. Thesis, Mikkeli: VTT Technical Research Centre of Finland.

Verma, S.K., Khandegar, V., Saroha, A.K., 2013. *Removal of Chromium from Electropelating Industry Effluent Using Electrocoagulation*. *Journal of Hazardous and Toxic Radioactive Wastewater*. XVII: 146-152.

Wardhani, Eka. 2003. *Penerapan Metode Elektrokoagulasi dalam Pengolahan Air Limbah Industri Penyamakan Kulit*. Bandung: ISSN No. 2088-4818.

World Health Organization. 2003. *Chromium in Drinking-Water*. Guidelines for drinking-water quality : Geneva.

Xu, Hai-yin., Yang, Zhao-hui., Zeng, Guang-ming., Luo, Yuan-ling., Huang, Jing., Wang, Li-ke., Song, Pei-pe., Mo, Xi. 2014. *Investigation of pH evolution with Cr(VI) removal in electrocoagulation process: Proposing a real-time control strategy*, *Chemical Engineering Journal*, 239:132-140. China: Hunan University.





LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN DAN DATA

Perhitungan konduktivitas

$$k = \sum c z \lambda$$

k = konduktivitas S/cm

z = no atom

c = konsentrasi mol/L

λ = Equivalent Conductivity (Scm²/mol)

Tabel Equivalent Conductivity

Ion	Equivalent Conductivity (Scm ² /mol)
H ⁺	349,8
Cl ⁻	76,35
Na ⁺	50,11

(Miller, 1988)

Pengaturan pH larutan menggunakan HCl yaitu sampai pH menjadi 2,

$$[H^+] \rightarrow pH = -\log [H^+]$$

$$[H^+] = 10^{-pH}$$

$$pH = 2$$

$$[H^+] = 10^{-2}$$

$$= 0,01 \text{ mol/L}$$

$$= 0,00001 \text{ mol/cm}^3$$

$$z_{H^+} = z_{Cl^-} = 1$$

Perhitungan nilai konduktivitas jika pH = 2

$$k = \sum c z \lambda$$

$$= (c_{H^+} \times z_{H^+} \times \lambda_{H^+}) + (c_{Cl^-} \times z_{Cl^-} \times \lambda_{Cl^-})$$

$$= (0,00001 \times 1 \times 349,8) + (0,00001 \times 1 \times 76,35)$$

$$= 0,00001 (349,8 + 76,35)$$

$$= 0,00001 \times 426,15$$

$$= 0,0042615 \text{ S/cm}$$

$$k = 4,2615 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$$

Perhitungan Massa $K_2Cr_2O_7$ yang dibutuhkan untuk membuat limbah sintetik Cr(VI) 100ppm

Data

$$\text{Ar K} = 39 \text{ gr/mol}$$

$$\text{Ar Cr} = 52 \text{ gr/mol}$$

$$\text{Ar O} = 16 \text{ gr/mol}$$

$$\text{Mr } K_2Cr_2O_7 = 2 \cdot \text{Ar K} + 2 \cdot \text{Ar Cr} + 7 \cdot \text{Ar O}$$

$$= 2(39) + 2(52) + 7(16)$$

$$= 78 + 104 + 112$$

$$= 294 \text{ gram/mol}$$

$$\text{Mr } Cr_2O_7 = 2 \cdot \text{Ar Cr} + 7 \cdot \text{Ar O}$$

$$= 2(52) + 7(16)$$

$$= 104 + 112$$

$$= 216 \text{ gram/mol}$$

$$\text{Massa } Cr_2O_7 = \text{kons. } Cr_2O_7 \times \text{Volume larutan}$$

$$= 100 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$= 100 \text{ mg/l} \times 1 \text{ l}$$

$$= 100 \text{ mg}$$

$$\text{Massa } K_2Cr_2O_7 = \frac{\text{Mr } K_2Cr_2O_7}{\text{Mr } Cr_2O_7} \times \text{massa } Cr_2O_7$$

$$= \frac{294 \text{ gr/mol}}{216 \text{ gr/mol}} \times 100 \text{ mg}$$

$$= 1,362 \times 100 \text{ mg}$$

$$= 136,2 \text{ mg}$$

Perhitungan % Removal Cr(VI)

Contoh perhitungan

Data diambil saat proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda ukuran $2,5 \times 2 \text{ cm}$ dengan waktu 5 menit, Cr total yang dibaca Uv-Vis sebesar 40,5 ppm.

Perhitungan konsentrasi Cr(VI)

Konsentrasi awal Cr(VI) = 100 ppm

$$\text{Konsentrasi Cr(VI) akhir} = \frac{\text{Mr } Cr_2O_7}{2 \cdot \text{Ar Cr}} \times \text{konsentrasi Cr total akhir}$$

$$= \frac{216 \text{ gr/mol}}{2 \cdot 52 \text{ gr/mol}} \times 40,5 \text{ ppm}$$

$$= 2,077 \times 40,5 \text{ ppm}$$

$$= 84,115 \text{ ppm}$$

$$\% \text{Removal} = \frac{\text{Konsentrasi Cr(VI) awal} - \text{Konsentrasi Cr(VI) akhir}}{\text{Konsentrasi Cr(VI) awal}} \times 100\%$$

$$= \frac{100 - 84,115 \text{ ppm}}{100 \text{ ppm}} \times 100\%$$

$$= \frac{15,885}{100} \times 100\%$$

$$= 15,885\%$$

Hasil Perhitungan

No	Ukuran Pelat (cm)	Waktu (menit)	Konsentrasi (ppm)		% Removal
			Cr Total	Cr (VI)	
1	2,5 x 2	0	48,1481	100	0
		5	40,5	84,115	15,885
		10	29,4	61,062	38,938
		15	26,7	55,454	44,546
		20	25,6	53,169	46,831
		25	23,7	49,223	50,777
2	2,5 x 3	0	48,1481	100	0
		5	30,1	62,515	37,485
		10	26,4	54,831	45,169
		15	25,6	53,169	46,831
		20	23,5	48,808	51,192
		25	22,9	47,562	52,438
3	2,5 x 4	0	48,1481	100	0
		5	29,4	61,062	38,938
		10	23,7	49,223	50,777
		15	22,4	46,523	53,477
		20	22,1	45,900	54,100
		25	20,5	42,577	57,423

4	3 x 4	0	48,1481	100	0
		5	23,2	48,185	51,815
		10	22,1	45,900	54,100
		15	22	45,692	54,308
		20	21,4	44,44615	55,553846
		25	19,5	40,5	59,5

Perhitungan Kuat Arus Listrik

Contoh data dari penelitian untuk luas permukaan 10 cm² pada waktu 5 menit

$$m_{Al} = 0,0101 \text{ gr}$$

$$t = 5 \text{ menit} = 300 \text{ detik}$$

$$Ar_{Al} = 27 \text{ gr/mol}$$

$$F \text{ (konstanta Faraday)} = 96485 \text{ C/mol}$$

$$z \text{ (jumlah elektron)} = 3$$

Rumus

$$m = \frac{I \cdot t \cdot Ar_{Al}}{z \cdot F}$$

maka

$$I = \frac{m \cdot z \cdot F}{t \cdot Ar_{Al}}$$

Perhitungan

$$I = \frac{m \cdot z \cdot F}{t \cdot Ar_{Al}}$$

$$I = \frac{0,0101 \cdot 3 \cdot 96485}{300 \cdot 27}$$

$$I = 0,3609 \text{ A}$$

Hasil Perhitungan

Luas Permukaan (cm ²)	Waktu (detik)	Konduktivitas (mS)	Massa Al Terdisolusi (gr)	Kuat Arus (A)
10	0	4	0	
	300	1,162	0,0101	0,3609
	600	1,141	0,0318	0,5682
	900	1,1	0,0348	0,4151

15	1200	1,092	0,0465	0,4154
	1500	1,085	0,0519	0,3712
	0	4	0	
	300	1,143	0,016	0,5718
	600	1,139	0,037	0,6599
	900	1,087	0,0496	0,5908
	1200	1,028	0,0585	0,5231
	1500	1,022	0,0748	0,5348
20	0	4	0	
	300	1,138	0,0316	1,1304
	600	1,112	0,0417	0,7451
	900	1,051	0,0517	0,6158
	1200	1,001	0,0641	0,5722
	1500	0,992	0,0803	0,5739
	0	4	0	
	300	1,12	0,0324	1,1566
24	600	1,093	0,0491	0,8773
	900	1,02	0,0533	0,6345
	1200	0,992	0,0681	0,6084
	1500	0,973	0,082	0,5861

Perhitungan dan analisa BNT (Beda Nyata terkecil)

Uji BNT (Beda Nyata terkecil) atau yang lebih dikenal sebagai uji LSD (*Least Significance Different*) adalah sebagai acuan dalam menentukan rata-rata dua perlakuan berbeda secara statistik atau tidak.

Untuk menghitung nilai BNT atau LSD, kita membutuhkan beberapa data yang berasal dari perhitungan sidik ragam (ANOVA) yang telah dilakukan sebelumnya, data tersebut berupa MSE dan dfe. Selain itu juga butuh tabel t-student. Secara lengkap rumusnya adalah sbb:

$$BNT_{\alpha} = (t_{\alpha, dfe} \cdot \sqrt{\frac{2(MSE)}{r}}) \quad (3.1)$$

Dimana:

BNT_α = Beda Nyata terkecil

MSE = Mean Square Error

t_{αdfe} = Nilai tabel untuk derajat bebas galat pada taraf sebesar α (95%)

r = banyaknya replikasi atau variasi setiap perubahan

Nilai BNT (LSD) inilah yang menjadi pembeda antar rata-rata dua populasi sampel, bila rata-rata dua populasi sampel lebih kecil atau sama dengan nilai LSD, maka dinyatakan tidak berbeda signifikan. Atau dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$|(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)| \leq LSD_{\alpha} = \text{Tidak Berbeda Signifikan}$$

dimana

\bar{x} = Nilai rata-rata tiap perlakuan

Jika nilai $x_2 - x_1$ lebih kecil daripada nilai BNT nya maka kenaikan atau penurunan data tidak berbeda signifikan, apabila nilai $x_2 - x_1$ lebih besar dari pada BNT maka kenaikan atau penurunan data terjadi berbeda signifikan

Analisa signifikansi removal Cr(VI)

Data

	Luas Permukaan cm ²			
	10	15	20	24
0	0	0	0	0
5	15,8846	37,4846	38,9385	51,8154
10	38,9385	45,1692	50,7769	54,1
15	44,5462	46,8308	53,4769	54,3077
20	46,8308	51,1923	54,1	55,5538
25	50,7769	52,4385	57,4231	59,5

Mencari sidik ragam (ANOVA) yang dihitung pada Mx.Exel

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
10	6	196,9769	32,82949	411,53
15	6	233,1154	38,85256	390,3582
20	6	254,7154	42,45256	473,0359
24	6	275,2769	45,87949	511,5771

ANOVA

Source of Variation	SS	Df	MS	F	P-value	F crit
---------------------	----	----	----	---	---------	--------



Between Groups	559,8975	3	186,6325	0,417873	0,742108	3,098391
Within Groups	8932,506	20	446,6253			
Total	9492,403	23				

Setelah itu menghitung BNT

Dimana

$$BNT_{\alpha} = (t_{\alpha, df_e}) \cdot \sqrt{\frac{2(MS_E)}{r}}$$

$$BNT_{\alpha} = 1,648277 \cdot \sqrt{\frac{2(446,6253)}{4}}$$

$$BNT_{\alpha} = 24,63128$$

Data selisih tiap %removal

	AVR
x0	0
x1	42,2615
x2	50,7077
x3	52,525
x4	53,8577
x5	57,3192

Maka didapat data analisa signifikasi dari %removal Cr(VI)

Selisih Tiap perlakuan	Nilai Selisih	Signifikasi
x1-x0	36,0308	Berbeda signifikan
x2-x0	47,2462	Berbeda signifikan
x3-x0	49,7904	Berbeda signifikan
x4-x0	51,9192	Berbeda signifikan
x5-x0	55,0346	Berbeda signifikan
x2-x1	11,2154	Tidak berbeda signifikan
x3-x1	13,7596	Tidak berbeda signifikan
x4-x1	15,8885	Tidak berbeda signifikan
x5-x1	19,0038	Tidak berbeda signifikan

x3-x2	2,5442	Tidak berbeda signifikan
x4-x2	4,6731	Tidak berbeda signifikan
x5-x2	7,7885	Tidak berbeda signifikan
x4-x3	2,1288	Tidak berbeda signifikan
x5-x3	5,2442	Tidak berbeda signifikan
x5-x4	3,1154	Tidak berbeda signifikan

Analisa signifikansi perubahan pH

Data

		Luas Permukaan cm ²			
		10	15	20	24
Waktu (menit)	0	2	2	2	2
	5	3,73	4,04	4,05	4,06
	10	3,96	4,05	4,07	4,07
	15	4,08	4,09	4,12	4,12
	20	4,14	4,15	4,16	4,18
	25	4,17	4,18	4,19	4,2

Mencari sidik ragam (ANOVA) yang dihitung pada Mx.Exel

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
10	6	22,08	3,68	0,703
15	6	22,51	3,751667	0,739417
20	6	22,59	3,765	0,75043
24	6	22,63	3,771667	0,756497

ANOVA	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Source of Variation						
Between Groups	0,032079	3	0,010693	0,014502	0,997534	3,098391
Within Groups	14,74672	20	0,737336			
Total	14,7788	23				

Setelah itu menghitung BNT

Dimana



$$BNt_{\alpha} = (t_{\alpha, dfe}) \cdot \sqrt{\frac{2(MSE)}{r}}$$

$$BNt_{\alpha} = 1,724718 \cdot \sqrt{\frac{2(0,737336)}{4}}$$

$$BNt_{\alpha} = 1,047215$$

Data selisih tiap pH

	AVR
x0	2
x1	4,026667
x2	4,059167
x3	4,114167
x4	4,165833
x5	4,191667

Maka didapat data analisa signifikansi perubahan pH

Selisih Tiap perlakuan	Nilai Selisih	Signifikasi
x1-x0	1,9700	Berbeda signifikan
x2-x0	2,0375	Berbeda signifikan
x3-x0	2,1025	Berbeda signifikan
x4-x0	2,1575	Berbeda signifikan
x5-x0	2,1850	Berbeda signifikan
x2-x1	0,0675	Tidak berbeda signifikan
x3-x1	0,1325	Tidak berbeda signifikan
x4-x1	0,1875	Tidak berbeda signifikan
x5-x1	0,2150	Tidak berbeda signifikan
x3-x2	0,0650	Tidak berbeda signifikan
x4-x2	0,1200	Tidak berbeda signifikan
x5-x2	0,1475	Tidak berbeda signifikan
x4-x3	0,0550	Tidak berbeda signifikan
x5-x3	0,0825	Tidak berbeda signifikan
x5-x4	0,0275	Tidak berbeda signifikan

Analisa signifikansi perubahan konduktivitas

Data

	Luas Permukaan Cm2
--	--------------------

	10	15	20	24	
	0	4	4	4	4
	5	1,162	1,143	1,138	1,12
Waktu (menit)	10	1,141	1,139	1,112	1,093
	15	1,1	1,087	1,051	1,02
	20	1,092	1,028	1,001	0,992
	25	1,085	1,022	0,992	0,973

Mencari sidik ragam (ANOVA) yang dihitung pada Mx.Exel

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
10	6	9,58	1,596667	1,387149
15	6	9,419	1,569833	1,420069
20	6	9,294	1,549	1,44517
24	6	9,198	1,533	1,463942

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0,013638	3	0,004546	0,003181	0,999744	3,098391
Within Groups	28,58165	20	1,429083			
Total	28,59529	23				

Setelah itu menghitung BNt

Dimana

$$BNt_{\alpha} = (t_{\alpha, dfe}) \cdot \sqrt{\frac{2(MS_E)}{r}}$$

$$BNt_{\alpha} = 6,313752 \cdot \sqrt{\frac{2(1,429083)}{4}}$$

$$BNt_{\alpha} = 5,337048$$

Data selisih tiap konduktivitas

	AVE
x5	4
x4	1,14075
x3	1,12125
x2	1,0645
x1	1,02825
x0	1,018

Maka didapat data analisa signifikasi perubahan konduktivitas

Selisih Tiap perlakuan	Nilai Selisih	Signifikasi
x1-x0	0,0102	Tidak berbeda signifikan
x2-x0	0,0465	Tidak berbeda signifikan
x3-x0	0,1033	Tidak berbeda signifikan
x4-x0	0,1228	Tidak berbeda signifikan
x5-x0	2,9820	Tidak berbeda signifikan
x2-x1	0,0363	Tidak berbeda signifikan
x3-x1	0,0930	Tidak berbeda signifikan
x4-x1	0,1125	Tidak berbeda signifikan
x5-x1	2,9718	Tidak berbeda signifikan
x3-x2	0,0567	Tidak berbeda signifikan
x4-x2	0,0762	Tidak berbeda signifikan
x5-x2	2,9355	Tidak berbeda signifikan
x4-x3	0,0195	Tidak berbeda signifikan
x5-x3	2,8788	Tidak berbeda signifikan
x5-x4	2,8593	Tidak berbeda signifikan

Analisa signifikasi perubahan massa Al

Data

	Luas Permukaan Cm ²			
	10	15	20	24
0	0	0	0	0
5	0,0101	0,016	0,0316	0,0324
10	0,0318	0,037	0,0417	0,0491
15	0,0348	0,0496	0,0517	0,0533
20	0,0465	0,0585	0,0641	0,0681
25	0,0519	0,0748	0,0803	0,082

Mencari sidik ragam (ANOVA) yang dihitung pada Mx.Exel

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
10	6	0,175183	0,029197	0,000414
15	6	0,235908	0,039318	0,000766
20	6	0,269383	0,044897	0,000774
24	6	0,284833	0,047472	0,000827

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0,001181	3	0,000394	0,565968	0,643779	3,098391
Within Groups	0,013908	20	0,000695			
Total	0,015089	23				

Setelah itu menghitung BNT

Dimana

$$BNT_{\alpha} = (t_{\alpha, df_e}) \cdot \sqrt{\frac{2(MS_E)}{r}}$$

$$BNT_{\alpha} = 1,724718 \cdot \sqrt{\frac{2(0,000695)}{4}}$$

$$BNT_{\alpha} = 0,03216$$

Data selisih tiap massa Al

	AVE
x5	0,0000
x4	0,0225
x3	0,0399
x2	0,0474
x1	0,0593
x0	0,0723



Maka didapat data analisa signifikansi perubahan massa Al

Selisih Tiap perlakuan	Nilai Selisih	Signifikansi
x_1-x_0	0,0225	Tidak berbeda signifikan
x_2-x_0	0,0399	Berbeda signifikan
x_3-x_0	0,0474	Berbeda signifikan
x_4-x_0	0,0593	Berbeda signifikan
x_5-x_0	0,0723	Berbeda signifikan
x_2-x_1	0,0174	Tidak berbeda signifikan
x_3-x_1	0,0248	Tidak berbeda signifikan
x_4-x_1	0,0368	Berbeda signifikan
x_5-x_1	0,0497	Berbeda signifikan
x_3-x_2	0,0075	Tidak berbeda signifikan
x_4-x_2	0,0194	Tidak berbeda signifikan
x_5-x_2	0,0324	Berbeda signifikan
x_4-x_3	0,0119	Tidak berbeda signifikan
x_5-x_3	0,0249	Tidak berbeda signifikan
x_5-x_4	0,0130	Tidak berbeda signifikan

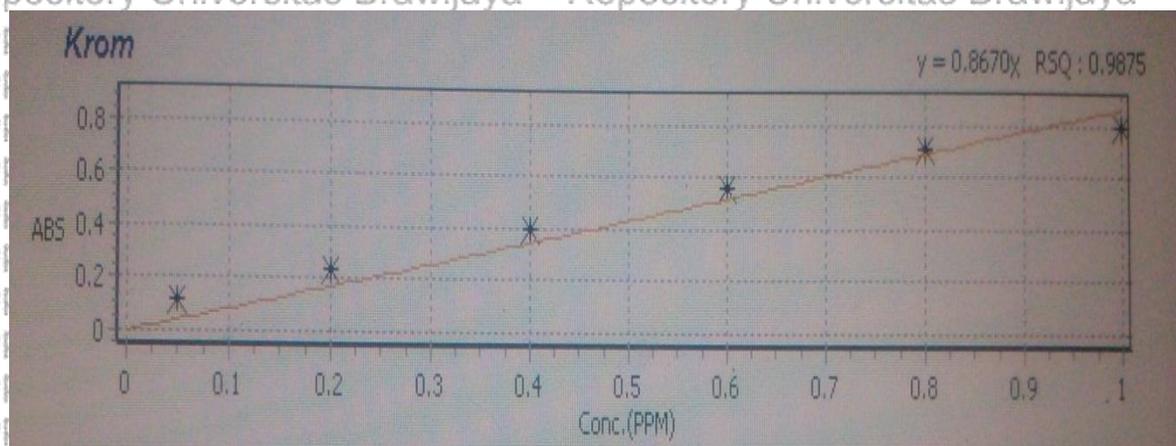
LAMPIRAN 2

PERSIAPAN KURVA KALIBRASI

Persiapan kurva kalibrasi: untuk mengompensasi sedikit kehilangan kromium dalam proses pengasaman atau operasi analisis lainnya, perlakukan larutan standar dengan prosedur yang sama dengan sampel. Selain itu, pipet larutan standar (5 ug/mL) dengan volume terukur antara 2,00 sampai 20,0 mL, untuk membuat larutan standar untuk 10 sampai 100 ug Cr, ke dalam beaker atau conical flask 250-mL. Tahap selanjutnya bergantung pada kondisi sampel, apabila sampel tidak membutuhkan pretreatment, maka larutan standar tidak perlu pretreatment.

Selanjutnya sampel standar dikomplekskan untuk menghasilkan warna. Larutan yang telah dikomplekskan selanjutnya ditransfer ke dalam sel adsorpsi (kuvet) 1 cm sesuai ketentuan dan ukurlah absorbansi pada 540 nm menggunakan blanko air. Koreksi pembacaan absorbansi larutan standar dengan mensubstrat absorbansi blanko yang digunakan pada metode ini.

Buat kurva kalibrasi dengan plot data absorbansi yang telah dikoreksi terhadap microgram kromium pada larutan akhir (102 mL).



Kurva kalibrasi



LAMPIRAN 3

DOKUMENTASI

No	Dokumentasi	Keterangan
1		Pembuatan deionized water pH 2
2		Pembuatan limbah sintetik Cr(VI) 100 ppm pada pH 2



72

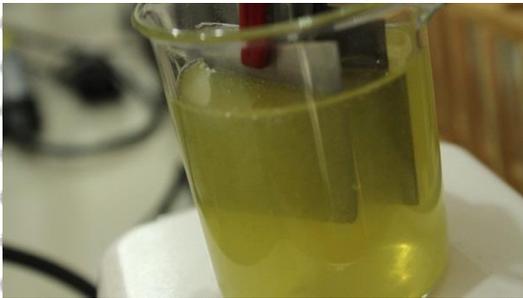


3



Perangkaian alat elektrokogulasi

4



Proses elektrokogulasi

5



Pengukuran pH larutan



Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya

6



Pengukuran konduktivitas larutan

7



Pengambilan sampel pada saat t tertentu sebanyak 1 ml

8



Hasil limbah sintetik Cr(VI) setelah proses elektrokoagulasi



Perbandingan larutan Cr(VI) sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi

- a. Limbah sintetik Cr(VI) sebelum proses elektrokoagulasi
- b. Limbah sintetik Cr(VI) setelah proses elektrokoagulasi

a

**LAMPIRAN 4****RIWAYAT HIDUP**

Arfian Dwi Fanani, Mojokerto 12 Mei 1994, anak dari Muhasan dan Asmunah, lulus dari MI Al-Hikmah Ngareskidul, SMP Negeri 1 Gedeg, SMA Negeri 1 Gedeg, lulus program sarjana Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016. Pengalaman kerja sebagai asisten praktikum Kimia Organik dan Kimia Analisis di Laboratorium Sains Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2014 dan 2016. Praktek Kerja Lapang di PT. Air Liquide Indonesia Cilegon, Banten tahun 2015.



LAMPIRAN 4

RIWAYAT HIDUP

Luqman Hakim Harahap, Pekanbaru 6 Agustus 1994, anak dari Paembangun Muda Harahap dan Indah Ernawati, lulus dari SD Negeri Polehan 3, SMP Negeri 5 Malang, SMA Negeri 1 Malang, lulus program sarjana Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016. Pengalaman kerja sebagai asisten praktikum Kimia Organik di Laboratorium Sains Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2014. Praktek Kerja Lapang di PT. Petrokimia Gresik Pabrik I Unit ZA tahun 2015.