

**PENYISIHAN KADAR SULFAT (SO_4^{2-}) PADA LIMBAH CAIR
INDUSTRI PERTAMBANGAN BATUBARA MENGGUNAKAN
TEKNIK ELEKTROKOAGULASI**

SKRIPSI

TEKNIK KIMIA

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



HAMENGGU SAMUDRO PARANGKIRANA

NIM.145061101111014

SOFYAN ABDULLAH NASUTION

NIM.145061101111017

**JURUSAN TEKNIK KIMIA
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG**

2018



repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN
PENYISIHAN KADAR SULFAT (SO₄²⁻) PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI
PERTAMBANGAN BATUBARA MENGGUNAKAN TEKNIK
ELEKTROKOAGULASI

SKRIPSI

TEKNIK KIMIA

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



HAMENGGU SAMUDRO PARANGKIRANA

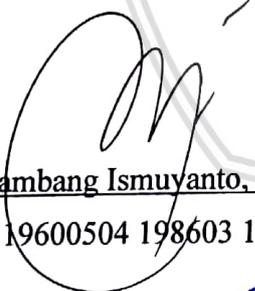
NIM. 145061101111014

SOFYAN ABDULLAH NASUTION

NIM. 145061101111017

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


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


Juliananda, ST., M.Sc.
NIP. 201304 830718 2 001



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

IDENTITAS TIM PENGUJI

JUDUL SKRIPSI : Penyisihan Kadar Sulfat (SO_4^{2-}) Pada Limbah Cair Industri
Pertambangan Batubara Menggunakan Teknik Elektrokoagulasi

Nama Mahasiswa : Hamengku Samudro Parangkirana / 145061101111014

Sofyan Abdullah Nasution / 145061101111017

Jurusan S1 : Teknik Kimia

TIM DOSEN PENGUJI

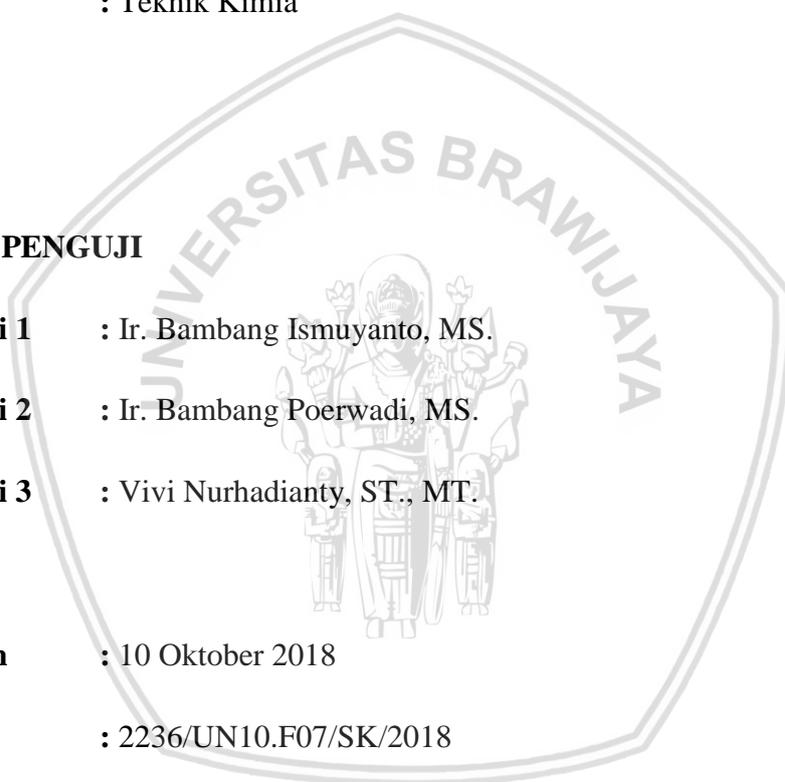
Dosen Penguji 1 : Ir. Bambang Ismuyanto, MS.

Dosen Penguji 2 : Ir. Bambang Poerwadi, MS.

Dosen Penguji 3 : Vivi Nurhadianty, ST., MT.

Tanggal Ujian : 10 Oktober 2018

SK Penguji : 2236/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran 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 yang 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 Oktober 2018

Mahasiswa,



Hamengku Samudro Parangkirana

145061101111014



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran 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 yang 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 Oktober 2018

Mahasiswa,



Sofyan Abdullah Nasution

145061101111017





UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 109/UN10.F07.13/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

HAMENGGU SAMUDIO PARANGKIRANA

Dengan Judul Skripsi :

Penyisihan Kadar Sulfat (SO_4^{2-}) pada Limbah Cair Industri Pertambangan Batubara menggunakan Teknik Elektrokoagulasi (*Sulphate Ion Removal in Coal Mine Industry Wastewater by Electrocoagulation*)

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 25 OCT 2018



Ketua Program Studi Teknik Kimia

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



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 110/UNI0.F07.13/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

SOFYAN ABDULLAH NASUTION

Dengan Judul Skripsi :

Penyisihan Kadar Sulfat (SO_4^{2-}) pada Limbah Cair Industri Pertambangan Batubara menggunakan Teknik Elektrokoagulasi (*Sulphate Ion Removal in Coal Mine Industry Wastewater by Electrocoagulation*)

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 25 OCT 2018



Ketua Program Studi Teknik Kimia

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

For Our Beloved Families And Friends Who
Support us To Achieve Our Dreams!
Thank You For Your Prayers, Everything That
Make us Stronger Than Before!

It's about process, how fast you rise up when you feel failure -writers



KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat serta nikmat dan kemudahan yang telah diberikan kepada kami, sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Penyisihan Ion Sulfat Pada Limbah Cair Industri Pertambangan Batubara Menggunakan Teknik Elektrokoagulasi.

Skripsi ini diajukan sebagai syarat utama untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Universitas Brawijaya. dalam penyusunan skripsi ini, penulis tidak terlepas dari peranan dosen pembimbing dan bantuan dari seluruh pihak. Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-NYA penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik .
2. Ir. Bambang Poerwadi, M.S., selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia Universitas Brawijaya .
3. Ir. Bambang Ismuyanto, M.S selaku Dosen Pembimbing I, Juliananda ST., M.Sc selaku Dosen Pembimbing II dan Nurul Faiqotul Himma, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing III atas saran, bimbingan serta arahnya yang dengan sabar telah meluangkan waktu untuk membimbing dan mengarahkan penulis sampai terselesaikannya skripsi ini.
4. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
5. Agustin Rahayu, A.Md, selaku Laboran Laboratorium Sains Jurusan Teknik Kimia Universitas Brawijaya atas bantuan, saran dan dukungannya.
6. Seluruh civitas akademika Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
7. Untuk kedua orang tua saya Bapak Ifan Santoso dan Ibu Ika Agustia Purwohanida tercinta dan tersayang yang tiada hentinya memotivasi dalam segala hal, dengan sabar mendoakan untuk kebajikan dan kesuksesan putranya.
8. Untuk kedua orang tua saya Bapak Syahril Nasution dan Ibu Elly Yunita tercinta dan tersayang yang tiada hentinya memberikan doa, motivasi dan materi untuk kesuksesan putranya

9. Untuk saudari-saudariku Trisna Widasari Nasution, Syally Dwi Andrina Nasution dan Anggi Syerlina Utari yang sudah memotivasi penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan skripsinya
10. Untuk saudaraku Airlangga Segoro Bayu Biru dan Fikri Aulia Khoirunnisa yang sudah memotivasi penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan skripsinya.
11. Sahabat dan teman-teman seperjuangan di Medan yang telah memberikan semangat, motivasi dan saran-saran terbaik kepada penulis untuk menyelesaikan naskah skripsi ini dengan sebaik mungkin.
12. Sahabat dan teman seperjuangan di Slawi Yulianis Zella, Zata, Reza, Lisa, Emma, Irfan, Dwi, Hanifa, Maulina, Bani, Hardina, Fahmy, Andini, Ray, Safitri, Tita, Shilla, Yudhi, Chingu, Rafika, Izmy, Bella, Renny, Shinta, Mihau, Abay, Frando, Mufi, Nafi, Emil, Ulin, Bayu dan Gamanasa 23, terimakasih atas selalu memberikan semangat dan memotivasi kepada penulis selama pengerjaan skripsi ini. Semoga impian yang tertanam bisa dituai bersama.
13. Teman – teman Kos Jayadipa, Derian, Vrisco, Dirga, Dede, Keanu, Pantriko, Gerry, Diaz, Dahong, Reihangga, Naufal, Hamna, Fadhil, Irham, Ilham, Ikhsan, Riza, terimakasih atas selalu memberikan semangat dan motivasi kepada penulis selama pengerjaan skripsi ini.
14. Teman-teman Teknik Kimia 2014 dan KBMTK, terimakasih untuk waktu dan kebersamaan kalian selama perkuliahan.

Semoga amal baik semua pihak mendapat imbalan dari Allah SWT. Kami menyadari bahwa selama penyusunan skripsi ini banyak kekurangan baik dari tutur kata serta tindakan yang kurang menyenangkan kepada pihak manapun, kami terbuka untuk menerima kritik dan saran yang membangun. Semoga naskah skripsi ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak di masa yang akan datang.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Malang, 3 September 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR SIMBOL	ix
RINGKASAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Rumusan Masalah	3
1.3.Batasan Masalah.....	3
1.4.Tujuan.....	4
1.5.Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1.Air Asam Tambang (AAT)	5
2.1.1. Ion Sulfat	7
2.2. Metode Penyisihan Ion Sulfat	8
2.2.1. Presipitasi.....	9
2.2.2. Bioremediasi	9
2.2.3. Teknologi Membran	9
2.2.4. Adsorpsi atau Ion Exchange	10
2.2.5. Koagulasi	10
2.3.Elektrokoagulasi.....	12
2.3.1. Reaksi Proses Elektrokoagulasi	12
2.3.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Elektrokoagulasi.....	16
2.3.3. Kelebihan dan Kekurangan Proses Elektrokoagulasi	21
2.4.Analisa Sulfat	21
2.5.Penelitian Terdahulu.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1. Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	27
3.2. Variabel Penelitian	27
3.2.1. Variabel Bebas	27



3.2.2. Variabel Kontrol	27
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	28
3.3.1. Alat.....	28
3.3.2. Bahan	28
3.4. Prosedur Penelitian	29
3.4.1. Proses Pembuatan Larutan Limbah Induk SO_4^{2-} Sintetis 1000 ppm....	29
3.4.2. Proses Pembuatan Larutan Buffer B.....	30
3.4.3. Proses Pembuatan Larutan Kurva Kalibrasi	31
3.4.4. Proses Pembuatan Larutan Kerja Limbah SO_4^{2-} Sintetis 550 ppm.....	33
3.4.5. Pembuatan Kurva Kalibrasi Turbidimeter	31
3.4.6. Proses Perlakuan Awal Plat Elektroda.....	32
3.4.7. Rangkaian Alat Sistem Elektrokoagulasi	35
3.4.8. Proses Elektrokoagulasi.....	36
3.4.9. Analisa Kadar Ion Sulfat dengan Turbidimeter	37
3.4.10. Pengukuran Massa Endapan Setelah Elektrokoagulasi	39
3.4.11. Pengukuran Perubahan Massa Plat Elektroda	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1. Pengaruh Tegangan (Voltase) Terhadap Penyisihan Ion Sulfat	41
4.2. Pengaruh Jarak Antar Elektroda Terhadap Penyisihan Ion Sulfat.....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1. Kesimpulan	51
5.2. Saran	51
Daftar Pustaka	53
Lampiran	57

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Penelitian terdahulu	23
Tabel 4.1.	Data hasil penelitian elektrokoagulasi pada penyisihan ion sulfat dalam limbah cair menggunakan elektroda Al/Al	43
Tabel 4.2.	Data hasil perhitungan jumlah gas gelembung yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi	44
Tabel 4.3.	Penelitian penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan metode elektrokoagulasi	50



(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pembentukan hidrogen sulfida dan asam sulfat.....	8
Gambar 2.2 Mekanisme proses koagulasi koloid.....	12
Gambar 2.3 Skema proses elektrokoagulasi.....	13
Gambar 2.4 Diagram distribusi pembentukan alumunium.....	17
Gambar 2.5 Monopolar elektroda parallel.....	19
Gambar 2.6 Monopolar elektroda seri.....	19
Gambar 2.7 Bipolar elektroda seri.....	20
Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan larutan sulfat sintetik.....	29
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan larutan buffer b.....	30
Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan larutan kurva kalibrasi.....	31
Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan larutan kerja.....	31
Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan kurva kalibrasi.....	32
Gambar 3.6 Diagram alir proses perlakuan awal pelat Al.....	34
Gambar 3.7 Diagram alir perangkaian alat proses elektrokoagulasi.....	35
Gambar 3.8 Rangkaian alat elektrokoagulasi dengan konfigurasi monopolar seri.....	36
Gambar 3.9 Diagram alir proses elektrokoagulasi.....	37
Gambar 3.10 Diagram alir pengenceran larutan sampel.....	38
Gambar 3.11 Diagram alir penentuan nilai NTU.....	38
Gambar 3.12 Diagram alir pengukuran massa endapan.....	39
Gambar 4.1. Grafik antara perbandingan persentasi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan perbedaan jumlah plat yang digunakan.....	42
Gambar 4.2. Grafik antara perbandingan persentasi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan variasi tegangan pada proses elektrokoagulasi dengan jarak antara elektroda (a) 1 cm, (b) 1,25 cm, (c) 1,5 cm, (d) 1,75 cm, (e) 2 cm.....	45
Gambar 4.3. Larutan limbah sintetis yang mengandung ion sulfat.....	47
Gambar 4.4. Grafik perbandingan antara efisiensi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan jarak antara elektroda pada proses elektrokoagulasi saat tegangan (a) 15 Volt; (b) 20 Volt; (c) 25 Volt; dan (d) 30 Volt.....	48
Gambar 4.5. Kondisi Plat.....	49

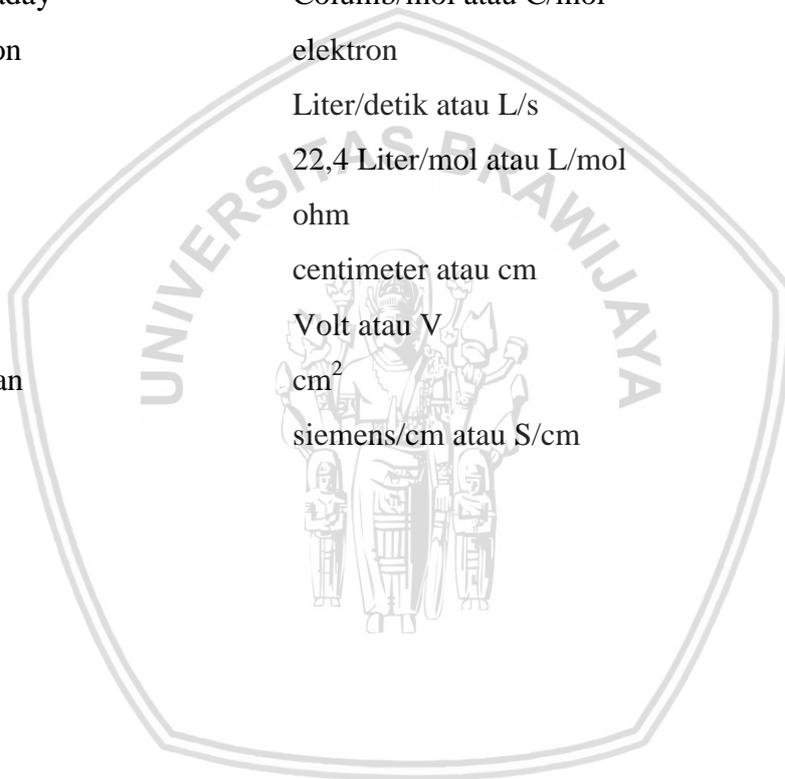


(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Massa	gram atau gr	m
Berat Molekul	gram/mol atau gr/mol	<i>M</i>
Arus listrik	Ampere atau A	<i>I</i>
Kerapatan Arus listrik	Ampere/cm ²	<i>j</i>
Waktu	detik atau s	<i>t</i>
Konstanta Faraday	Columb/mol atau C/mol	<i>F</i>
Jumlah Elektron	elektron	<i>n</i>
Laju gas	Liter/detik atau L/s	<i>Q</i>
Molar Volume	22,4 Liter/mol atau L/mol	<i>V₀</i>
Hambatan	ohm	<i>R</i>
Jarak	centimeter atau cm	<i>r</i>
Tegangan	Volt atau V	<i>V</i>
Luas permukaan	cm ²	<i>A</i>
Konduktivitas	siemens/cm atau S/cm	<i>k</i>



(halaman ini sengaja dikosongkan)



RINGKASAN

Hamengku Samudro Parangkirana, Sofyan Abdullah Nasution, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Maret 2018, *Penyisihan Sulfat (SO_4^{2-}) Pada Limbah Cair Industri Pertambangan Batubara Menggunakan Teknik Elektrokoagulasi*, Dosen Pembimbing : Bambang Ismuyanto dan Juliananda.

Kegiatan pertambangan batubara di Indonesia saat ini berkembang pesat dalam dua dekade terakhir. Produksi batubara akan terus meningkat, tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (domestik), tetapi untuk memenuhi permintaan luar negeri (ekspor). Kegiatan penambangan batubara menghasilkan limbah cair yaitu air asam tambang atau biasa dikenal dengan AAT. AAT adalah air yang bersifat asam yang mengandung berbagai logam terlarut seperti besi, mangan, seng, serta ion sulfat (SO_4^{2-}). Di dalam AAT kandungan senyawa kimia terbesar adalah ion sulfat dengan nilai sekitar 23–551 ppm. Sementara kadar ion sulfat diperbolehkan sesuai dengan baku mutu air limbah adalah sebesar 400 ppm dan termasuk kedalam golongan kelas satu. Kadar ion sulfat di dalam AAT dapat diolah dengan menggunakan teknik elektrokoagulasi.

Pada penelitian ini, proses elektrokoagulasi menggunakan prinsip *sacrificial anode* yaitu logam anoda akan larut dengan adanya arus listrik yang dihasilkan untuk membentuk koagulan $Al(OH)_3$ yang berfungsi mengikat ion sulfat dengan proses koagulasi. Konfigurasi yang digunakan pada proses elektrokoagulasi ini yaitu konfigurasi monopolar seri, dengan limbah sintesis yaitu elektrolit berupa larutan Na_2SO_4 dengan konsentrasi 550 ppm. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari tegangan dan jarak antara elektroda dalam penyisihan ion sulfat. variasi nilai tegangan yang digunakan pada penelitian ini yaitu 15 V, 20 V, 25 V, dan 30 V, serta variasi jarak antara elektroda yaitu 1 cm, 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm, dan 2 cm selama 80 menit. Kadar ion sulfat akan dianalisis menggunakan analisa turbiditas setelah proses elektrokoagulasi dengan mengacu pada standard SNI 06-6989.15-2004 tentang Cara Uji Sulfat, SO_4^{2-} dengan Turbidimeter.

Hasil dari penelitian ini bahwa proses elektrokoagulasi dapat menyisihkan kadar ion sulfat. Semakin tinggi tegangan pada proses elektrokoagulasi maka, nilai persentase penyisihan ion sulfat akan meningkat. Nilai persentase penyisihan ion sulfat tertinggi yaitu pada tegangan 30 V pada masing- masing jarak. Jarak antara elektroda yang semakin menurun dari 2 cm hingga 1 cm meningkatkan nilai persentase penyisihan ion sulfat pada proses elektrokoagulasi, pada penelitian ini jarak antara elektroda yang menghasilkan nilai penyisihan maksimum yaitu sebesar 1 cm. Nilai persentase penyisihan tertinggi yaitu pada tegangan 30 V dengan jarak 1 cm sebesar 86,3 %.

Kata Kunci : Air Asam Tambang, Elektrokoagulasi, Ion Sulfat, Jarak, Tegangan.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



SUMMARY

Hamengku Samudro Parangkirana, Sofyan Abdullah Nasution, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, March 2018, *Sulphate Removal in Coal Mine Industry Wastewater by Electrocoagulation*, Academic Supervisor: Bambang Ismuyanto and Juliananda.

Coal mine industry had significant development in Indonesia in the last two decades. The production of coal will increase because it has to fulfill domestic and export needs. The process in coal mine industry produces waste water, namely acid mine drainage (AMD). AMD is acid that contain many dissolved metals such as ferro, manganese, zinc, and sulphate. Sulphate is the biggest chemical compounds in AMD, the concentration of sulphate is about 23-551 ppm. Based on the quality standards, the allowed concentration of sulphate is 400 ppm. Sulphate could be removed by electrocoagulation method.

In this research, the electrocoagulation has a principle, that is sacrificial anode. Sacrificial anode is, when current was given on anode metal, anode metal will be dissolved and form a coagulant. Furthermore coagulant will enmesh sulphate to settle in the bottom of reactor. The configuration of electrodes is monopolar series, and the synthetic waste water is made from 550 ppm of Na_2SO_4 solution and measured with turbidimeter. The purpose of this research was to know how the effect of the voltage and the distance between electrodes for sulphate removal. The variables of voltage will be used are 15 V, 20 V, 25 V, and 30 V, while the distance between electrodes will be arranged as 1 cm, 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm, and 2 cm for 80 minutes process of electrocoagulation. Further, the concentration of sulphate will be measured with turbidity analysis which refers to SNI 06-6989.15-2004, SO_4^{2-} Analysis by Turbidimetre.

The results of this research were first, an electrocoagulation process can remove sulphate. Second, that higher voltage will increase the percentage of sulphate removal. The best voltage to remove sulphate was 30 V at each distance. Whereas the smaller distance between electrode will also increase the percentage of sulphate removal and the best was 1 cm. The highest percentage of sulphate removal was at 30 V and the distance between the electrodes was 1 cm, that was 86,3%.

Keywords : *Acid Mine Drainage, Distance, Electrocoagulation, Sulphate, Voltage*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kegiatan pertambangan batubara di Indonesia telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir. Produksi batubara diperkirakan akan terus meningkat, tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (domestik), tetapi juga untuk memenuhi permintaan luar negeri (ekspor). Sumber daya batubara di Indonesia sampai dengan tahun 2015 adalah sebesar 127 miliar ton batubara, sedangkan cadangan batubara sebesar 32,3 miliar ton. Lokasi batubara sebagian besar berada di Kalimantan dan sementara penggunaan batubara terbesar ada di Jawa. Berdasarkan *BP statistical review of world energy 2015*, perkembangan batubara di Indonesia pada tahun 2010 hingga 2013 mengalami peningkatan yang cukup pesat, dengan kenaikan produksi rata-rata 20,18% per tahun. Indonesia menempati posisi ke-3 produsen utama batubara di dunia setelah China dan USA. Kegiatan pertambangan memiliki beberapa tahapan yaitu diantaranya tahap konstruksi dan operasi penambangan. Pada tahapan-tahapan tersebut, dilakukan penggalian tanah tertutup. Apabila tanah tertutup tersebut digali dan batuan yang digali mengandung beberapa material mineral, seperti sulfida, pirit, markasit, pirohitit, dan lainya terpapar udara serta terfiltrasi oleh oksigen dan air hujan, maka akan terjadi pembentukan air asam tambang (AAT) (Hakim, 2009).

AAT merupakan air yang bersifat asam (dengan nilai $\text{pH} < 5$) yang mengandung berbagai logam terlarut seperti besi, seng, mangan, tembaga, serta ion sulfat (SO_4^{2-}). Pada AAT, kandungan senyawa kimia terbesar adalah ion sulfat. Ion sulfat terbentuk akibat mineral-mineral sulfida seperti FeS_2 mengalami reaksi oksidasi-reduksi dan hidrolisis. Mineral-mineral sulfida yang teroksidasi akan menjadi bentuk ion-ion logam berat yang terlarut dan juga sulphur yang berada dalam bentuk teroksidasi menjadi ion sulfat yang akan membentuk asam sulfat sehingga kondisi lingkungan menjadi asam. AAT dapat mencemari air permukaan dan air tanah yang dapat menurunkan kualitas lingkungan, khususnya lingkungan akuatik, kondisi ini dapat membahayakan kehidupan biota akuatik antara lain plankton, bentos, ikan, dan tumbuhan (Hakim, 2009). Lebih lanjutnya, konsentrasi sulfat yang tinggi dalam air juga dapat membahayakan kesehatan manusia dan merusak peralatan-peralatan di industri (Arahman dkk, 2017).

Konsentrasi ion sulfat pada industri di pertambangan di daerah Kalimantan Timur yang dihasilkan adalah berkisar 23 - 551 ppm (Afrida, 2014). Berdasarkan Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 tentang pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air, kadar ion sulfat yang sesuai dengan baku mutu air limbah adalah sebesar 400 ppm dan termasuk kedalam golongan kelas satu.

Ada beberapa teknologi untuk pengolahan ion sulfat yang terdapat di air, seperti degradasi secara biologis, filtrasi membran, adsorpsi dan pertukaran ion, serta pengendapan dengan batu kapur atau hidrolisis alumunium. Beberapa teknologi tersebut kurang efisien dikarenakan penyisihan ion sulfat yang tidak mudah, hal tersebut disebabkan oleh kelarutan dan stabilitas ion sulfat yang tinggi pada larutan (Mamelkina dkk, 2017). Adapun teknologi yang sedang dikembangkan untuk menyisihkan ion sulfat adalah dengan teknologi elektrokoagulasi. Perbedaan antara proses elektrokoagulasi dan koagulasi adalah cara penambahan koagulan. Pada koagulasi, reagen yang digunakan adalah FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ dan sebagainya, sementara pada elektrokoagulasi, logam elektroda dialiri aliran listrik dan akan teroksidasi untuk menghasilkan ion logam. Pada saat bersamaan dengan pelarutan material anoda, terjadi elektrolisis dari air yang dapat meningkatkan kualitas dari pengolahan air (Ahmad dkk, 2016). Sedangkan kelebihan dari proses elektrokoagulasi dibandingkan koagulasi konvensional adalah hanya membutuhkan sedikit reagen koagulan kimia (Mamelkina dkk, 2017).

Elektrokoagulasi melibatkan pembentukan dari koagulan secara *in-situ* dengan cara melarutkan logam anoda yang diikuti dengan pembentukan secara simultan dari ion hidroksil dan gas hidrogen pada katoda. Proses ini menghasilkan alumunium atau besi hidroksida yang sesuai atau polihidroksida (Moreno dkk, 2007). Keuntungan elektrokoagulasi adalah ketahanan yang baik, mudah diautomasi, dan energi yang dibutuhkan rendah sehingga memungkinkan proses ini dilakukan dengan sumber energi hijau seperti sel surya, angin atau sel bahan bakar (Mamelkina dkk, 2017). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses elektrokoagulasi meliputi suhu, waktu kontak, kuat arus listrik, tegangan, dan tingkat keasaman (pH) (Lestari dkk, 2014).

Penelitian ini mengacu pada penelitian lainnya mengenai penyisihan ion sulfat dengan proses elektrokoagulasi. Pada penelitian Maria A Mamelkina dan kawan-kawan (2017), didapatkan bahwa persentase efisiensi penyisihan ion sulfat menggunakan metode elektrokoagulasi sebesar 99,5% sedangkan metode koagulasi konvensional hanya sebesar 80%. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan katoda alumunium dan anoda besi dengan pH terbaik 2,5 untuk menghasilkan nilai efisiensi penyisihan ion sulfat yang

maksimum, serta kerapatan arus listrik yang efektif sebesar 70 mA/cm^2 . Selain itu, penelitian dari M. Muruganathan dan kawan-kawan (2004) menunjukkan bahwa selain dapat menyisihkan ion sulfat, elektrokoagulasi juga dapat menyisihkan kadar COD dan BOD dengan persentase efisiensi penyisihan hingga 90% menggunakan anoda aluminium. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa penyisihan ion sulfat dipengaruhi oleh kerapatan arus listrik yang diberikan dimana kerapatan arus listrik (*density current*) optimum senilai 62 mA/cm^2 dan pH optimum yaitu 5,5.

Mengacu pada penelitian lainnya mengenai penyisihan ion sulfat dengan metode elektrokoagulasi, pH, kerapatan arus listrik dan konfigurasi elektroda dapat mempengaruhi efisiensi penyisihan ion sulfat. Maka dari itu, penelitian ini difokuskan pada pengaruh tegangan (V) dan jarak antara elektroda (r) yang digunakan untuk persentase penyisihan ion sulfat.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh tegangan yang digunakan pada proses elektrokoagulasi terhadap penyisihan kadar ion sulfat (SO_4^{2-}) pada air limbah industri pertambangan batubara ?
2. Bagaimana pengaruh jarak antara elektroda yang digunakan pada proses elektrokoagulasi terhadap penyisihan kadar ion sulfat (SO_4^{2-}) pada air limbah industri pertambangan batubara ?

1.3. Batasan Masalah

1. Objek kajian hanya difokuskan pada penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) yang berasal dari air asam tambang (AAT) industri pertambangan batubara. Oleh karena itu, sampel air limbah yang digunakan merupakan limbah sintesis yang hanya mengandung (SO_4^{2-}) dengan konsentrasi 550 ppm hasil dari pelarutan Na_2SO_4 didalam akuades.
2. Plat elektroda yang digunakan pada percobaan ini adalah logam aluminium (Al) dengan ukuran $10 \text{ cm} \times 4,5 \text{ cm} \times 0,03 \text{ cm}$. Plat elektroda terendam dengan ukuran $4,5 \text{ cm} \times 4,5 \text{ cm}$.
3. Volume limbah cair yang digunakan berukuran 300 ml dengan menggunakan gelas beaker 400 ml sebagai reaktor.
4. Konfigurasi elektroda yang digunakan adalah monopolar seri.
5. Kondisi operasi pada suhu ruang (25°C) dan tekanan atmosfer.

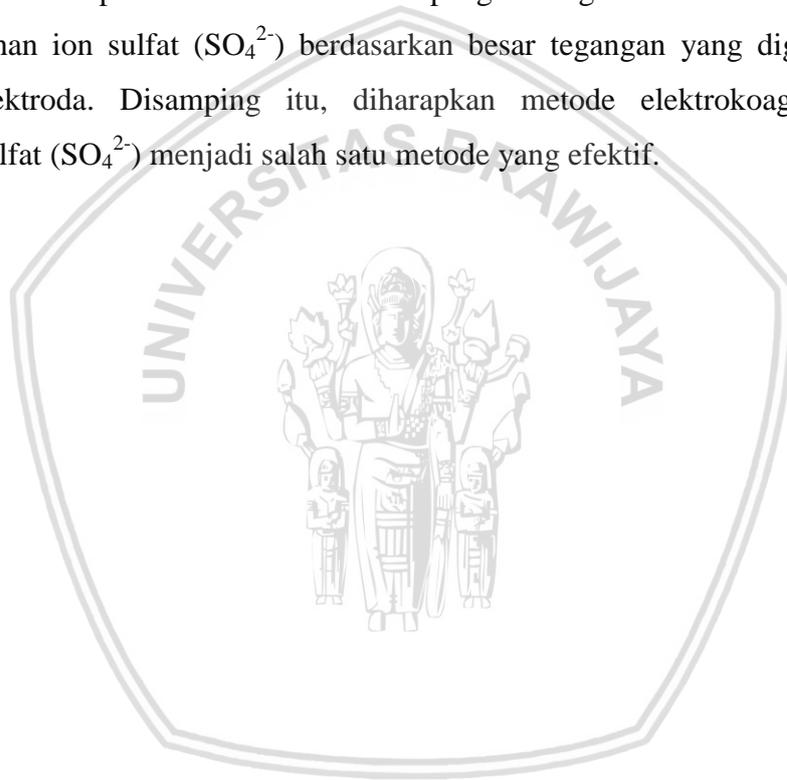
1.4. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui pengaruh tegangan yang digunakan pada proses elektrokoagulasi terhadap penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) pada air limbah industri pertambangan batubara.
2. Mengetahui pengaruh jarak antara elektroda yang digunakan pada proses elektrokoagulasi terhadap penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) pada air limbah industri pertambangan batubara.

1.5. Manfaat

Penelitian ini diharapkan bermanfaat untuk pengembangan teknik elektrokoagulasi terhadap penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) berdasarkan besar tegangan yang digunakan dan jarak antara elektroda. Disamping itu, diharapkan metode elektrokoagulasi untuk penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) menjadi salah satu metode yang efektif.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Air Asam Tambang (AAT)

Air asam tambang (AAT) atau dalam bahasa asing disebut *Acid Mine Drainage* (AMD) atau *Acid Rock Drainage* (ARD). Dalam industri pertambangan batubara disebut dengan *Coal Mine Drainage* (CMD) merupakan air yang terbentuk akibat kegiatan pertambangan terbuka maupun tertutup (bawah tanah) dimana terjadi reaksi antara air, oksigen, dan batuan-batuan yang mengandung mineral-mineral sulfida sehingga menyebabkan terjadinya air asam tambang.

Air asam tambang terbentuk apabila mineral-mineral sulfida khususnya pirit (FeS_2) yang terkandung dalam batuan pada saat penambangan berlangsung, bereaksi dengan air dan oksigen pada temperatur ambien dan tekanan atmosfer. Oksidasi pirit (FeS_2) akan membentuk ion Ferro (Fe^{2+}), ion sulfat (SO_4^{2-}), dan beberapa proton pembentuk keasaman, sehingga kondisi lingkungan menjadi asam.

Reaksi pembentukan air asam tambang adalah sebagai berikut :



Sehingga reaksi oksidasi pirit secara keseluruhan dapat dilihat pada persamaan reaksi



Reaksi antara besi, oksigen, dan air akan membentuk asam sulfat dan endapan besi hidroksi warna kekuningan didasar saluran tambang atau pada dinding kolam pengendapan lumpur yang merupakan tampak visual dari endapan besi hidroksida (*yellowboy*).

Adapun karakteristik kimia dari air asam tambang secara umum yaitu :

1. pH rendah (nilai pH berkisar antara 1,5 hingga 4)
2. Konsentrasi logam yang terlarut tinggi (seperti besi, aluminium, mangan, kadmium, tembaga, timah, seng, arsenik dan merkuri)
3. Nilai keasaman sebesar 50 – 15000 mg/L dan konduktivitas listrik umumnya antara 1000 – 20000 $\mu\text{s}/\text{cm}$
4. Konsentrasi yang rendah dari oksigen terlarut ($< 6 \text{ mg.L}$).
5. Tingkat kekeruhan (turbiditas) atau total padatan tersuspensi yang rendah.

Sedangkan karakteristik kimia dari air asam tambang pertambangan batubara yaitu diantaranya (Panigrah, 2010):

1. memiliki nilai pH 2,3 – 7,6 serta nilai pH rata-rata 4,2.
2. Konduktivitas listrik memiliki nilai 705 – 6760 $\mu\text{s}/\text{cm}$.
3. Konsentrasi ion sulfat pada air asam tambang batubara memiliki kadar sebesar 176 – 3615 mg/L.
4. kadar logam berat yang terlarut diantaranya Fe (2,1 – 255,6 mg/L), Al (0,13 – 34,6 mg/L), Ni (11,1 mg/L), Cr (0,13 mg/L), Zn (0,015 – 5,04 mg/L), Mn (0,53 – 25,3 mg/L), Cd (0,011 – 0,068 mg/L), Pb (0,09 – 0,142 mg/L) dan Cu (0,002 – 1,38 mg/L)

Air asam tambang dapat terjadi pada kegiatan penambangan baik pertambangan terbuka maupun pertambangan tertutup. Umumnya keadaan ini terjadi karena unsur sulfur yang terdapat di dalam batuan teroksidasi secara alamiah didukung juga dengan curah hujan yang tinggi semakin mempercepat perubahan sulfur oksida menjadi asam. Sumber air asam tambang berasal dari kegiatan sebagai berikut :

1. Air asam tambang terbuka
2. Air dari pengolahan batu buangan
3. Air dari lokasi penimbunan batuan
4. Air dari unit pengolahan limbah akhir

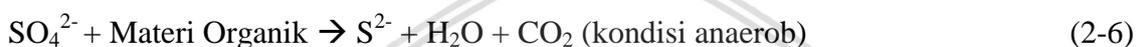
Dampak dari air asam tambang adalah dapat mencemari air permukaan dan air tanah yaitu dapat menurunkan kualitas lingkungan, khususnya lingkungan akuatik, kondisi ini dapat membahayakan kehidupan biota akuatik antara lain plankton, bentos, ikan, dan tumbuhan (Hakim, 2009). Lebih lanjutnya, konsentrasi sulfat yang tinggi dalam air juga dapat membahayakan kesehatan manusia dan merusak peralatan-peralatan di industri (Arahman, 2017).

Pada air asam tambang, kadar yang paling tinggi dihasilkan adalah kadar ion sulfat (SO_4^{2-}) dimana kadar yang dihasilkan adalah berkisar 23 – 551 ppm, oleh karena itu perlu dilakukan penyisihan ion sulfat dikarenakan memiliki dampak negatif diantaranya apabila tereduksi akan membentuk hidrogen sulfida dan teroksidasi akan membentuk asam sulfat (Afrida,2014).

2.1.1. Ion Sulfat (SO_4^{2-})

Ion sulfat merupakan salah satu anion yang terdapat pada air alam. Jika konsentrasi ion sulfat yang terdapat pada air berlebih, maka apabila terkonsumsi dapat terganggunya sistem pencernaan manusia. Selain itu, ion sulfat dapat menyebabkan terbentuknya kerak yang keras pada boiler dan heat exchanger sehingga dapat mempengaruhi operasi di industri (Sawyer, 2003).

Pada penanganan dan proses pengolahan air limbah, ion sulfat yang terkandung di dalam air limbah dapat menyebabkan masalah diantaranya bau yang dihasilkan serta terjadinya korosi. Bau yang dihasilkan tersebut diakibatkan pada saluran pembuangan air limbah, ion sulfat mengalami reduksi menjadi hidrogen sulfida dalam kondisi anaerob, seperti persamaan reaksi dibawah ini (Sawyer, 2003):



Berdasarkan reaksi diatas, dengan tidak adanya nitrat dan oksigen yang terlarut, ion sulfat akan berfungsi sebagai penerima elektron untuk proses oksidasi biokimia yang terkatalisis oleh bakteri anaerob dalam kondisi tanpa adanya oksigen, ion sulfat akan tereduksi menjadi ion sulfida yang akan mencapai kesetimbangan dengan ion hidrogen untuk membentuk hidrogen sulfida sesuai dengan konstanta ionisasi utamanya $K_{A1} = 9,1 \times 10^{-8}$ dan $K_{A2} = 1,3 \times 10^{-13}$.

Pada wilayah air limbah domestik dengan kondisi suhu yang tinggi, waktu tinggal limbah pada saluran pembuangan sangatlah lama sehingga konsentrasi ion sulfat yang cukup tinggi menyebabkan korosi pada beton saluran pembuangan (Sawyer, 2003).

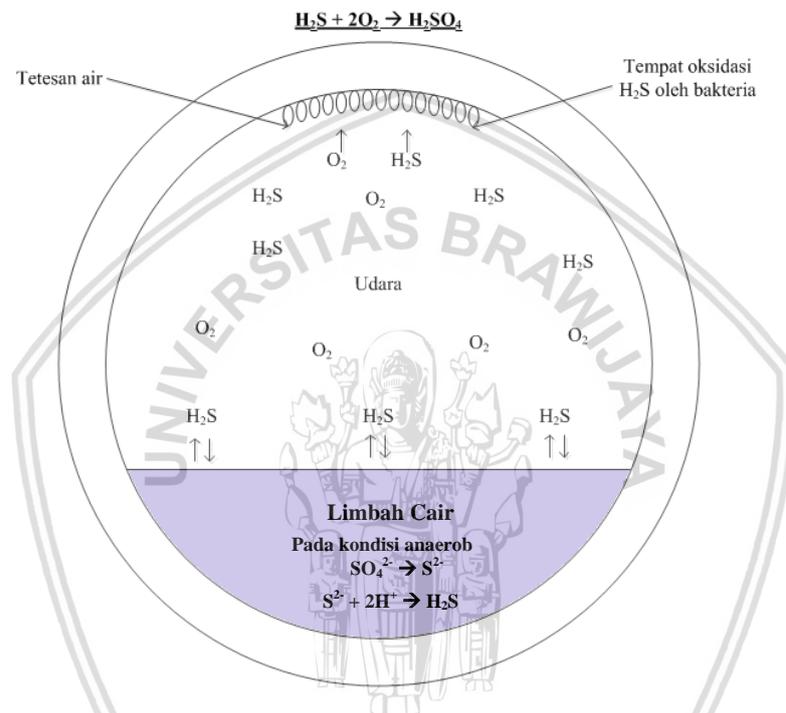
Pada saluran pembuangan air limbah, terjadi perubahan biologis selama air limbah mengalir. Perubahan biologis ini membutuhkan oksigen, apabila jumlah oksigen yang tersedia pada proses aerasi didalam saluran pembuangan tidak terpenuhi, maka reaksi yang terjadi adalah terbentuknya sulfida. Sebagian besar sulfida diubah menjadi hidrogen sulfida dan sebagian dilepaskan menuju atmosfer diatas permukaan air limbah. Pembentukan hidrogen sulfida pada air limbah dapat diminimalisir apabila saluran pembuangan memiliki ventilasi yang cukup untuk proses sirkulasi udara. (Sawyer, 2003).

Pada saluran pembuangan air limbah, terdapat bakteri yang dapat mengoksidasi hidrogen sulfida menjadi asam sulfat. Bakteri tersebut yaitu berasal dari genus *Thiobacillus* yang mampu bekerja pada proses aerob dan dapat mengoksidasi sulfat menjadi asam sulfat

dengan pH 2. Karena kondisi aerob yang terjadi pada saluran pembuangan di permukaan air limbah maka reaksi yang terjadi yaitu (Sawyer, 2003) :



Dengan terbentuknya asam sulfat maka akan menyebabkan terjadinya korosi pada dinding saluran pembuangan air limbah, hal ini dikarenakan bakteri tersebut merusak dinding saluran pembuangan air limbah pada saat kondisi aliran arus air limbah tinggi. (Sawyer, 2003) :



Gambar 2.1 Pembentukan hidrogen sulfida dan asam sulfat.

Konsentrasi ion sulfat yang tinggi serta kondisi pH yang rendah dapat menyebabkan aliran gas yang diumpukan oleh drainase dari tambang batubara akan membentuk endapan mineral seperti mineral sulfida, mineral sulfida yang terbentuk akan teroksidasi melalui kombinasi bakteri dan bahan kimia yang menghasilkan asam sulfat dan hasil pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan terbentuknya gas oksida dari belerang terhidrolisis yang bereaksi dengan air hujan untuk membentuk asam sulfat sehingga dapat menghasilkan hujan asam (Sawyer, 2003).

2.2. Metode Penyisihan Ion Sulfat

Penyisihan ion sulfat dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti presipitasi dengan penambahan senyawa kimia, pengolahan secara biologi, teknologi membran, dan

adsorpsi atau *ion exchange* (Dou, 2017). Selain itu teknologi elektrokoagulasi telah menjadi salah satu teknologi yang menjanjikan untuk penyisihan ion sulfat pada limbah cair industri (Mamelkina, 2017).

2.2.1. Presipitasi

Penyisihan ion sulfat dari drainase air pertambangan dengan metode pengendapan bisa dilakukan dengan cara sebagai berikut :

1. Pengendapan dengan gipsium berupa kapur atau batu gamping
2. Pengendapan dengan barium sulfat
3. Pembentukan padatan

Pengendapan dengan barium sulfat dapat diterapkan pada limbah cair yang bersifat asam dan hasilnya menjadikan konsentrasi residu sulfat yang sangat rendah (Silva dkk, 2012). Adapun reaksi dengan penambahan kapur terhidrasi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), di mana pengendapan menjadi CaSO_4 ditunjukkan sebagai berikut (Walker, 2015) :



2.2.2. Bioremediasi

Teknologi bioremediasi menggunakan *sulfate reducing bacteria* (SRB) telah dipertimbangkan oleh peneliti-peneliti dikarenakan keefektivitasannya dalam penyisihan ion sulfat dan logam-logam berat secara bersamaan dari limbah cair industri dan sumber air lainnya. Proses anaerob berdasarkan pada fakta bahwa ion sulfat dijadikan sebagai penerima elektron sementara sumber substrat dari senyawa organik bertindak sebagai pemberi elektron yang akan mengarah kepembentukan ion sulfida dan ion bikarbonat. Hasil sulfida yang dihasilkan dalam bentuk presipitasi ion logam di mana memiliki kelarutan yang sangat rendah dan bikarbonat dapat meningkatkan pH dari limbah cair. Proses bioremediasi dapat dilihat sebagai berikut (Najib, 2017) :



2.2.3. Teknologi Membran

Nanofiltrasi (NF) adalah membran yang digunakan pada teknik pengolahan air yang penerapannya untuk pengolahan limbah cair dan air industri (seperti penyisihan kesadahan

air, air bewarna dan senyawa organik). Membran NF memiliki karakteristik pemisahan dalam rentang antara *reverse osmosis* (RO) dan ultrafiltrasi (UF). Pada beberapa penelitian yang telah dilakukan (Wang dan kawan-kawan, 2005; Dai dan kawan-kawan, 2002; Zhang dan kawan-kawan, 2005; Krieg dan kawan-kawan, 2004) bahwa membran dengan jenis ESNA-1 yang diterapkan pada pemisahan jenis-jenis garam yang berbeda dan menemukan bahwa rejeksi dari kebanyakan garam menurun dengan penambahan konsentrasi dan akibat dari rejeksi terhadap anion yaitu $R(\text{SO}_4^{2-}) > R(\text{Cl}) > R(\text{NO}^-)$ pada rentang konsentrasi garam dari 10 mol/m^3 hingga 100 mol/m^3 . Sementara pada penelitian Schep dan kawan-kawan pada tahun 2001 telah melaporkan bahwa rejeksi dari Na_2SO_4 menggunakan membrane NF40 dan UTC20 menghasilkan efisiensi sebesar 90% pada tekanan 10 bar (Gawaad, 2011)

2.2.4. Adsorpsi atau *Ion Exchange*

Pada proses ini, adsorpsi merupakan sebuah pertukaran dari ion atau molekul antara padatan dan cairan tanpa perubahan yang besar pada struktur padatannya. Ion sulfat dihilangkan pada fase cairnya akan dilekatkan pada struktur padat dengan pertukaran ion lainnya (biasanya ion hidrogen atau hidroksil) sehingga membuat ion sulfat terperangkap dalam padatan. Pada kasus sulfat, CaSO_4 menjadi anion yang biasanya akan ditukar dengan hidroksil pada sebuah resin bermuatan positif (resin anion) sementara kalsium menjadi sebuah kation akan ditukar dengan hidrogen dan dilekatkan ke resin bermuatan negatif (resin kation). Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Bowell, 2004) :

Regenerasi kation :



Regenerasi anion :



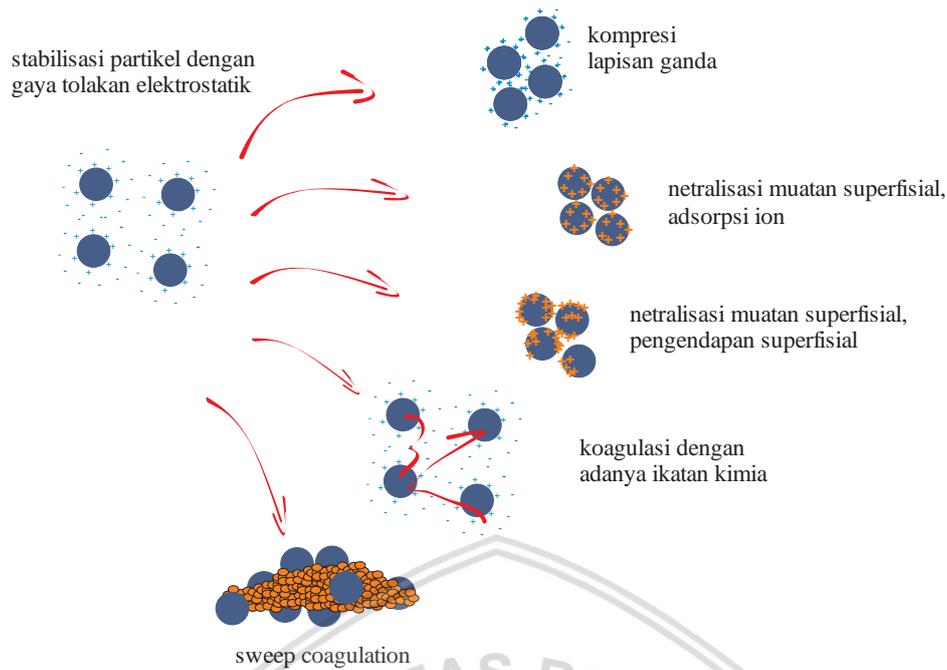
2.2.5. Koagulasi

Proses koagulasi adalah proses penambahan senyawa kimia yang digunakan untuk semua reaksi dan mekanisme yang melibatkan destabilisasi kimiawi dari partikel-partikel yang akan membentuk partikel yang lebih besar dengan proses flokulasi (terkumpulnya partikel-partikel dengan rentang 0,01 hingga $1 \mu\text{m}$). Dalam berbagai referensi, istilah koagulan dan flokulan adalah satu kesatuan dalam proses koagulasi. Secara umum, koagulan adalah senyawa kimia yang ditambahkan untuk mendestabilisasi partikel koloid dalam limbah cair sehingga menghasilkan pembentukan flok. Flokulan adalah senyawa

kimia, biasanya senyawa organik ditambahkan untuk meningkatkan proses flokulasi (Tchobanoglous, 2003).

Ada tiga mekanisme destabilisasi partikulat melalui proses koagulasi. Adsorpsi dan netralisasi muatan, adsorpsi dan pembentukan jembatan antar partikel (*interparticle bridging formation*) dan *sweep coagulation*. Adsorpsi dan netralisasi muatan adalah suatu mekanisme dimana garam logam yang terhidrolisis akan teradsorpsi ke dalam partikel koloid yang terdapat dalam limbah cair sehingga akan membentuk flok yang bermuatan netral. Mekanisme yang kedua adalah adsorpsi dan pembentukan jembatan antar partikel, dimana pada mekanisme ini partikel-partikel akan melekat pada sisi aktif dari polimer-polimer anionik dan nonionik (netral). Selanjutnya akan terbentuk jembatan ketika satu atau lebih partikel-partikel yang teradsorpsi sepanjang rantai polimer. Jembatan antar partikel akan menyatu dengan jembatan antar partikel lainnya untuk membentuk flok yang lebih besar. Adapun mekanisme yang ketiga adalah *sweep coagulation*. Ketika jumlah konsentrasi logam garam yang cukup tinggi ditambahkan, maka akan terbentuk flok-flok besar yang akan mengendap secara perlahan. Selama partikel-partikel flok mengendap, flok tersebut akan mengikat kontaminan. Kontaminan akan terperangkap di dalam flok yang selanjutnya akan lebih mudah dipisahkan dari air limbah dengan proses sedimentasi. (Metcalf, 2003)

Koagulan dan flokulan didapat secara alamiah serta dalam bentuk polimer organik sintetis yaitu logam garam seperti alum, dan logam garam pra-hidrolisis seperti polyaluminium klorida (PACl) dan polyiron klorida (PICI), sementara pada flokulan, biasanya digunakan polimer organik untuk meningkatkan efisiensi proses koagulasi (Tchobanoglous, 2003).



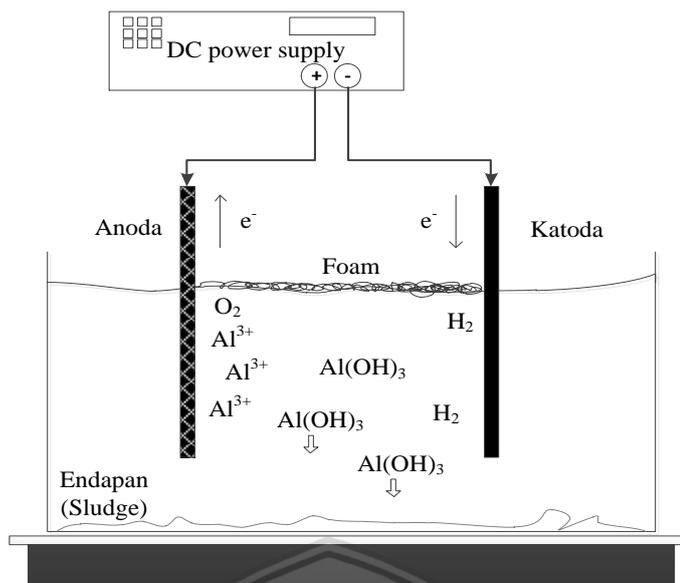
Gambar 2.2 Mekanisme proses koagulasi koloid (Cabrales, 2014)

2.3. Elektrokoagulasi

2.3.1. Reaksi Proses Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi pada prinsipnya yaitu berdasarkan pada proses sel elektrolisis. Sel elektrolisis merupakan suatu proses yang dapat mengubah energi listrik DC (*direct current*) untuk menghasilkan reaksi elektrodik. Setiap sel elektrolisis mempunyai dua elektroda, katoda dan anoda (Hanum, 2015).

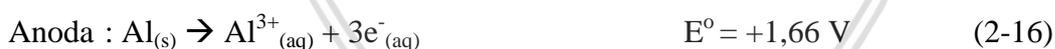
Teknologi elektrokoagulasi dan elektroflotasi adalah proses pengolahan yang menerapkan arus listrik untuk mengolah dan membentuk flok dari kontaminan-kontaminan tanpa penambahan koagulan kimia. Shammass dan kawan-kawan menyatakan bahwa koagulasi terjadi dengan adanya arus listrik yang diberikan, memungkinkan untuk menyisahkan partikel-partikel kecil karena adanya arus listrik tersebut akan membuat sebuah gerakan di dalamnya. Elektrokoagulasi juga dapat mengurangi sisa-sisa dari produksi limbah (Butler, 2011). Kation dalam teknik elektrokoagulasi dihasilkan secara *in situ* melalui penguraian anoda dalam larutan, biasanya plat elektroda yang digunakan berupa besi atau aluminium (Cabrales dan Machuca-Martinez, 2014).



Gambar 2.3 Skema proses elektrokoagulasi (Cabralles, 2014)

Prinsip dasar reaksi elektrokoagulasi adalah reaksi elektrolisis (reaksi reduksi dan oksidasi). Dalam suatu sel elektrokoagulasi peristiwa oksidasi terjadi di anoda, sedangkan reduksi terjadi di katoda. Dalam reaksi elektrokoagulasi, selain elektroda juga melibatkan air yang akan diolah berfungsi sebagai larutan elektrolit. Apabila dalam suatu elektrolit diletakkan dua elektroda dan dialiri arus listrik searah, maka akan terjadi proses elektrokimia yaitu gejala dekomposisi elektrolit, di mana kation bergerak ke katoda yang berfungsi sebagai penerima elektron yang akan tereduksi, serta anion bergerak ke anoda sebagai pendonor elektron yang akan teroksidasi (Hanum, 2015).

Mekanisme



Pada elektrolisis, elektroda aluminium yang berperan sebagai anoda akan mengalami oksidasi ion aluminium (Al^{3+}) selain itu air akan mengalami oksidasi untuk menghasilkan ion hidrogen (H^+) dan gas oksigen. Sedangkan pada katoda air akan tereduksi menjadi gas hydrogen dan ion hidroksil (OH^-) (Ahmad Zaki, 2006).

Reaksi elektrolisis terbagi menjadi dua jenis yaitu reaksi redoks secara spontan dan reaksi redoks secara tidak spontan. Reaksi redoks secara spontan yaitu reaksi elektrokimia yang tidak memerlukan energi atau arus listrik dari luar sistem, ditandai nilai dari E° sel positif. Sedangkan reaksi redoks secara tidak spontan membutuhkan adanya arus listrik

dari luar sistem, hal ini ditandai dengan nilai dari E° sel negatif (Comninelis dan Chen, 2010)

$$E^{\circ}_{\text{sel}} = E^{\circ}_{\text{katoda}} - E^{\circ}_{\text{anoda}}$$

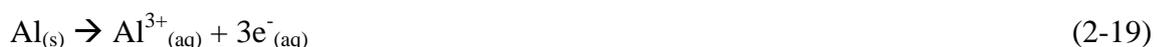
Pada proses elektrokoagulasi juga terjadi proses elektroflotasi. Elektroflotasi (EF) adalah suatu proses sederhana yang mengapungkan (*floatation*) polutan-polutan permukaan air yang diakibatkan adanya gelembung-gelembung hidrogen dan oksigen yang terbentuk dari elektrolisis air. Dalam kata lain, flotasi dari polutan-polutan yang dilakukan oleh molekul gas yang dihasilkan selama proses elektrolisis membantu meningkatkan proses penyisihan ion sulfat (Gupta dan Ali, 2013).

Secara umum, proses elektrokoagulasi terjadi secara berturut-turut dalam tiga tahap, pembentukan koagulan dengan oksidasi elektrolit dari *sacrificial anode*, destabilisasi kontaminan-kontaminan, suspensi partikulat dan pemecahan emulsi, serta yang terakhir yaitu fase restabilisasi untuk membentuk flok yang lebih besar sehingga akan mengendap. Adapun mekanisme dari destabilisasi kontaminan, suspensi partikel, dan pemecahan emulsi telah dijelaskan dengan beberapa tahap dan dirangkum sebagai berikut (Mollah, 2001) :

1. Kompresi dari difusi lapisan ganda di sekitar spesies yang bermuatan terjadi akibat interaksi ion yang dihasilkan dari proses oksidasi pada *sacrificial anode*, selama terjadinya pemberian arus listrik pada larutan.
2. Memberikan muatan untuk melakukan netralisasi pada spesies ion dalam air limbah menggunakan ion berlawanan yang dihasilkan oleh *sacrificial anode* untuk meningkatkan gaya tarik menarik *Van der Waals* antar ion tersebut yang menyebabkan koagulasi
3. Pembentukan flok dari hasil proses koagulasi berupa *sludge* yang dalam hal ini berupa partikel yang terperangkap dalam pengendapan dan partikel koloid yang masih tersisa di media larutan.

Reaksi elektrokimia secara umum yang terjadi pada proses elektrokoagulasi yaitu (Pulkka, 2014) :

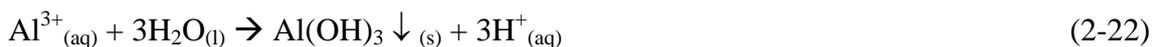
Reaksi yang terjadi pada anoda aluminium adalah sebagai berikut :



Pada kondisi alkalin, reaksinya sebagai berikut :



Sementara pada kondisi asam yang terjadi adalah sebagai berikut :



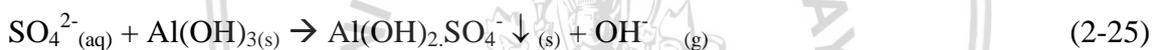
Reaksi pada alumunium hidroksida terpolimerisasi yaitu :



Pada katoda terjadi proses pembentukan gas hidrogen :



Ion alumunium akan bereaksi dengan gugus OH^{-} untuk membentuk alumunium hidroksida yang berfungsi sebagai koagulan untuk mengikat kontaminan. Ketika nilai pH diantara 4 hingga 9, ion Al^{3+} dan OH^{-} dihasilkan oleh elektroda yang bereaksi untuk membentuk berbagai spesies monomer seperti $\text{Al}(\text{OH})_2^{+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, spesies polimer seperti $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ yang akhirnya membentuk kedalam $\text{Al}(\text{OH})_3$ amorf yang tak larut (Merzouk, 2008). Mekanisme dari penyisihan ion sulfat dengan metode elektrokoagulasi dimana ion sulfat akan teradsorpsi ke permukaan alumunium hidroksida, sesuai yang ditunjukkan pada reaksi (2-22). Pada reaksi tersebut, terjadi interaksi kimia antara ion sulfat dan senyawa logam hidroksil yang dikarenakan adanya gaya listrik yang diberikan pada sistem (Miguel, 2017).



Masalah yang paling penting ketika menggunakan anoda alumunium adalah terjadinya pasivasi ketika $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan Al_2O_3 mengendap, sehingga mengganggu kinerja dari anoda yang menyebabkan tingginya energi yang dibutuhkan serta meningkatnya biaya perawatan. Pasivasi dapat dihindari menggunakan kombinasi kerapatan arus yang rendah disertai kondisi aliran yang turbulen (Miguel, 2017)

Adapun perhitungan dari jumlah massa kation logam terlarut selama reaksi pada anoda dapat diperhitungkan dengan menggunakan persamaan hukum Faraday, yaitu: (Ahmad, 2006)

$$m = \frac{M \times I \times t}{F \times n} \quad (2-26)$$

di mana F adalah konstanta Faraday yang memiliki nilai konstanta sebesar 96.485 C/mol, I adalah arus listrik (A), t adalah waktu operasi (detik), M adalah berat molekul dari substansi (g/mol), dan n merupakan jumlah elektron dalam reaksi (2 untuk Fe^{2+} dan 3 untuk Fe^{3+} dan Al^{3+}) dan m adalah massa logam terlarut dalam satuan gram (Ahmad, 2006).

2.3.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrokoagulasi

2.3.2.1. Kerapatan Arus

Arus listrik adalah salah satu parameter dari elektrokoagulasi. Elektrokoagulasi sering dirakit sebagai fungsi dari kerapatan arus dan didefinisikan sebagai rasio arus listrik pada luas permukaan elektroda. Kerapatan arus menentukan dosis koagulan pada anoda dan gas hidrogen (H_2) pada katoda yang berpengaruh pada hukum faraday. Kepadatan gelembung mempengaruhi sistem hidrodinamika yang menghasilkan perpindahan massa antara polutan, koagulan, gas gelembung berukuran mikro, dan akhirnya menentukan tingkat tumbukan partikel yang teraglomerasi serta menghasilkan pola aliran. Kerapatan arus dapat mempengaruhi jenis logam yang terhidrolisis melalui perubahan pH selama proses elektrokoagulasi sebagai fungsi alkalinitas saat arus listrik muncul. Oleh karena itu, dibutuhkan kontrol terhadap lingkungan fisik atau kimia yang dinamis untuk mengatur mekanisme koagulasi flokulasi secara langsung dan mendukung perpindahan ion elektrolit dan koloid yang bermuatan (Hakizimana, 2017).

Banyaknya gelembung yang terbentuk akan mengakibatkan terjadinya proses penyisihan polutan dan koagulan melalui proses yang dinamakan flotasi. Hal ini akan menyebabkan berkurangnya waktu kontak antara koagulan dan polutan. Sehingga koagulan yang terbentuk akan langsung terflotasi. Kerapatan arus yang terlalu tinggi juga dapat mengakibatkan pemanasan pada air limbah yang diproses sehingga akan mengurangi sejumlah energi listrik. Arus listrik yang optimal digunakan supaya dapat dioperasikan dalam waktu yang lama tanpa adanya perawatan adalah sekitar $20-25 \text{ Am}^{-2}$. Penetapan besaran arus listrik berkaitan dengan parameter operasi yang perlu diperhatikan seperti suhu dan pH untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi. (Holt, 2012).

Gelembung gas yang terbentuk, dapat dihitung dengan persamaan dari penerapan hukum faraday (Chen dan Christos, 2010) :

$$Q_H = \frac{I V_o}{n_H F} \quad (2-27)$$

$$Q_O = \frac{I V_o}{n_O F} \quad (2-28)$$

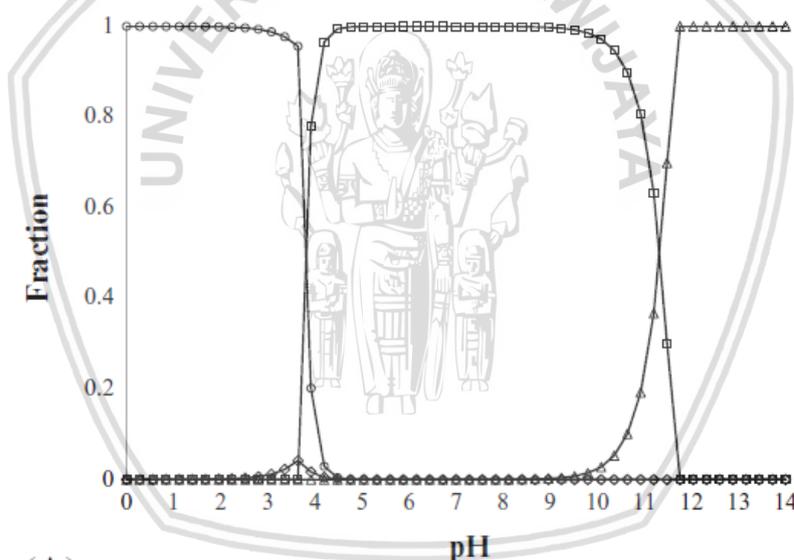
Dimana, Q_H adalah laju gas hidrogen yang terbentuk (L/s), Q_O adalah laju gas oksigen yang terbentuk (L/s), I adalah arus listrik yang diberikan (A), V_o molar volume dari gas pada kondisi STP (22,4 L /mol), F adalah konstanta faraday (96.500 C/mol elektron), n_H jumlah elektron dari H_2 (2 mol elektron per mol H_2) dan n_O adalah jumlah elektron untuk O_2 (4 mol elektron per mol). Sehingga dapat disederhanakan menjadi :

$$Q_g = Q_H + Q_O = \frac{IV_o}{F} \left(\frac{1}{nH} + \frac{1}{nO} \right) = 1,74 \times 10^{-4} I \quad (2-29)$$

dimana, Q_g adalah total laju gas yang terbentuk (L/s) pada kondisi STP.

2.3.2.2. pH

pH adalah faktor lain yang mempengaruhi adsorpsi dan koagulasi. Dapat dilihat pada gambar 2.4, dengan aluminium digunakan sebagai elektroda, diketahui bahwa jumlah dari aluminium hidroksida ($Al(OH)_3$) meningkat secara signifikan dengan kenaikan pH dari 5,2 hingga 8,8 yang bertujuan untuk menentukan jumlah koagulan yang terbentuk. Namun pada pH 9 hingga 10, aluminium akan terbentuk menjadi aluminat ($Al(OH)_4^-$) yang menyebabkan efisiensi penyisihan kadar sulfat menurun. Sementara ketika pada pH asam (pH 2-4) akan terbentuk senyawa $Al(OH)^{2+}$ (Bilyeu dkk, 2018).



Gambar 2.4 Diagram distribusi pembentukan aluminium, keterangan : (o) untuk Al^{3+} ; (□) untuk $Al(OH)_3$, (△) untuk $Al(OH)_4^-$ dan (◇) untuk $Al(OH)^{2+}$

2.3.2.3. Jarak Elektroda

Jarak antar elektroda mempengaruhi proses elektrokoagulasi, dimana nilai penurunan arus listrik (I) dan hambatan (R) akan meningkat seiring meningkatnya jarak antar elektroda. Penggunaan energi akan menurun dengan meningkatnya jarak antar elektroda. Semakin dekat jarak antar elektroda, maka efisiensi penyisihan polutan semakin meningkat dikarenakan keelektrokimianya menjadi lebih besar dan pembentukan gas gelembungnya

lebih banyak karena aliran yang dihasilkan semakin turbulen secara hidrodinamik dan transfer massanya semakin besar sehingga laju reaksi antara koagulan dan polutan semakin tinggi (Hakizima, 2017).

Pada jarak antar elektroda yang kecil dapat menghasilkan hambatan listrik pada sistem elektrokoagulasi yang rendah sehingga akan meningkatkan arus listrik serta akan mempercepat proses elektrokoagulasi. Hambatan listrik pada sistem elektrokoagulasi yang dipengaruhi oleh jarak antar elektroda dapat dituliskan persamaan sebagai berikut (Brahmi, 2015) :

$$R = \frac{r}{A \times k} \quad (2-30)$$

Dengan R adalah hambatan (ohm), r adalah jarak antar elektroda (cm), A adalah luas permukaan elektroda (cm²), serta k adalah konduktivitas larutan (S/cm).

Peningkatan efisiensi proses elektrokoagulasi dapat dilakukan dengan menurunkan jarak antar elektroda. Ketika jarak elektroda diperkecil maka hambatan yang terjadi pada antar elektroda akan menurun sehingga aliran arus listrik meningkat pada proses elektrokoagulasi. Hal ini akan sesuai dengan persamaan sebagai berikut (Harris, 2017):

$$V = I \times R \quad (2-31)$$

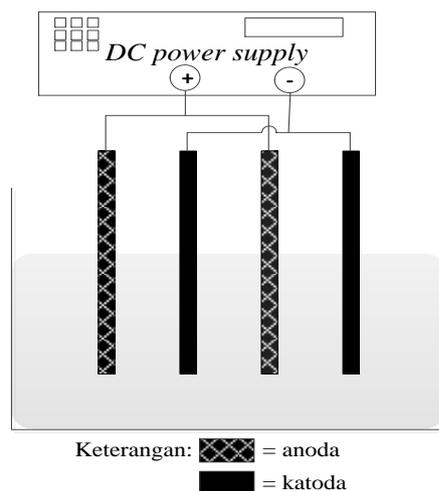
Dimana V adalah tegangan (volt), I adalah arus listrik (ampere) dan R adalah merupakan hambatan (ohm)

2.3.2.4. Konduktivitas dari air atau limbah cair

Efisiensi kerapatan arus listrik bergantung pada konduktivitas dan kekuatan ion dari air atau limbah cair. Efisiensi kerapatan arus listrik akan meningkat seiring dengan meningkatnya nilai konduktivitas elektrolitnya dan nilai resisten *ohmic* akan menurun dari air atau limbah cair. Konduktivitas akan menurun ketika jumlah polutan yang sudah tersisihkan tinggi dan seiring bertambahnya waktu (Hakizima, 2017).

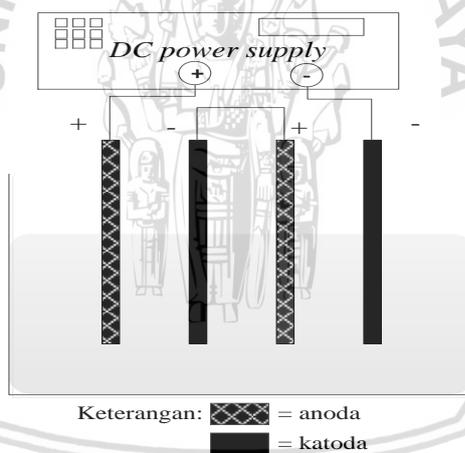
2.3.2.5. Konfigurasi elektroda.

Proses elektrokoagulasi dapat dipengaruhi oleh sistem elektroda melalui konfigurasi elektroda. Konfigurasi elektroda dapat terdiri dari anoda dan katoda atau dapat juga terdiri dari banyak anoda dan katoda kompleks pada sel elektrokoagulasi. Konfigurasi elektroda dapat diklasifikasikan dalam monopolar dan bipolar elektroda (Hakizima, 2017).



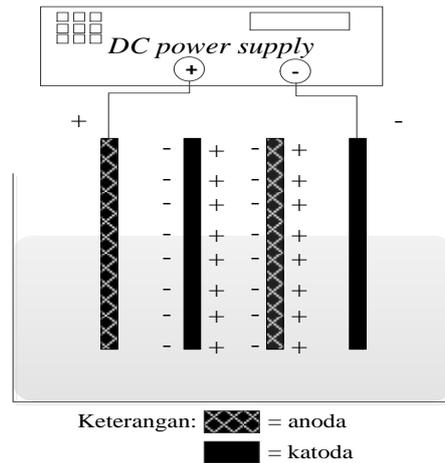
Gambar 2.5 Monopolar elektroda paralel

Pada gambar 2.5 merupakan rangkaian monopolar elektroda yang disusun secara paralel, monopolar elektroda paralel digambarkan sesuai dengan pengaturan elektroda yang terdiri dari katoda dan anoda yang ditempatkan secara alternatif pada potensial anodik atau katodik yang sama setiap pemasangan katoda/anoda sesuai dengan sel elektrolitik yang kecil di mana nilai voltasenya sama (Hakizima, 2017).



Gambar 2.6 Monopolar elektroda seri

Pada gambar 2.6 merupakan rangkaian monopolar elektroda yang disusun secara seri, dimana setiap pemasangan elektroda yang dikorbakan dari internal saling terhubung satu sama lain dan tidak memiliki interkoneksi dengan dua bagian elektroda luar. Dalam hal ini, arus listrik melewati semua elektroda nilainya sama, sedangkan tegangan keseluruhan berbeda dengan jumlah tegangan pada masing masing individu sel elektrolitik (Hakizima, 2017).



Gambar 2.7 Bipolar elektroda seri

Bipolar elektroda seri digambarkan pada gambar 2.7. Bipolar seri terdiri dari dua bagian elektroda luar yang terhubung ke satu daya listrik, dan elektroda yang dikorbakan ditempatkan diantara elektroda luar elektroda bipolar yang tidak saling berhubungan dan masing-masing sisi mereka bertindak sebagai anoda dan katoda, dan sisi berlawanan dari elektroda bipolar dibebankan, pelarutan anoda terjadi pada sisi positif, sedangkan sisi negatif rentan terhadap reaksi katodik (Hakizima, 2017).

Secara keseluruhan, monopolar elektroda memerlukan voltase yang lebih rendah dan arus listrik yang dibutuhkan tinggi. Pada bipolar elektroda dioperasikan dibawah kondisi arus listrik yang rendah dan voltasenya yang tinggi. Tetapi dari segi keuntungan lebih baik menggunakan konfigurasi elektroda monopolar dikarenakan biaya yang dikeluarkan rendah termasuk perawatannya yang mudah, serta dapat menyisihkan polutan dalam jumlah yang besar dengan penggunaan energy yang rendah (Hakizima, 2017).

Banyaknya jumlah elektroda yang digunakan pada elektrokoagulasi juga mempengaruhi daripada efisiensi penyisihan polutan. Menurut Kim dan kawan-kawan (2002), secara umum konduktivitas listrik dipengaruhi dengan luas permukaan plat elektroda. Jika jumlah elektroda meningkat maka luas area yang diberikan arus listrik juga akan meningkat. Sehingga efisiensi daripada arus listrik juga disebabkan oleh besarnya luas permukaan area dari katoda. Peningkatan efisiensi bergantung pada banyaknya jumlah elektroda yang digunakan karena daya yang dikonsumsi dapat relatif rendah dan juga biaya pengolahan lebih murah. Sedangkan menurut Eyvaz dan kawan-kawan (2014), apabila jumlah elektroda yang digunakan pada proses elektrokoagulasi hanya berjumlah 2 pelat, maka dibutuhkan kerapatan arus listrik yang tinggi dikarenakan luas permukaan area yang tercelup rendah.

2.3.2.6 Tegangan (Voltase)

Pada proses elektrokoagulasi, semakin besar tegangan yang diberikan maka efisiensi penyisihan akan semakin meningkat, karena dengan semakin besar tegangan yang diberikan, akan mengakibatkan absorbansi menurun. Penurunan absorbansi menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi telah terjadi proses koagulasi di dalam sampel air limbah dan terbentuk flok–flok yang akan mengendap, sehingga kadar dari polutan didalam limbah akan semakin berkurang pada saat tegangan dinaikkan, maka jumlah partikel-partikel ion akan semakin besar sehingga menyebabkan arus listrik yang mengalir semakin besar (Sunarya, 2013).

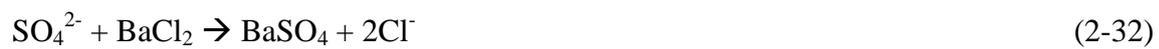
2.3.3. Kelebihan dan Kekurangan Proses Elektrokoagulasi

Proses elektrokoagulasi memiliki kelebihan dan kekurangan, untuk kelebihan dari metode pengolahan limbah cair menggunakan proses ini adalah diantaranya metode prosesnya yang tidak sulit, banyak digunakan pada pengolahan air minum dan limbah cair, di dalam proses elektrokoagulasi terdapat kombinasi dari oksidasi, koagulasi dan pengendapan sehingga biaya yang dikeluarkan tidak begitu mahal, proses elektrokoagulasi juga dapat mengurangi kebutuhan reagen kimia dan digantikan dengan menggunakan elektroda aluminium atau besi dan elektrisitas proses elektrokoagulasi juga menghasilkan *sludge* yang rendah serta kebutuhan energi yang digunakan tidak besar. Proses elektrokoagulasi juga memiliki kekurangan yaitu diantaranya perawatannya yang relatif sulit serta dapat terjadinya passivasi elektroda seiring berjalanya waktu dan proses tersebut juga membutuhkan air atau limbah cair yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi (Hakizimana, 2017).

2.4. Analisa Sulfat

Turbiditas adalah ukuran dari banyaknya partikulat di dalam air. Pengukuran turbiditas dilakukan dengan cara mendeteksi jumlah cahaya yang disebar oleh partikel di dalam air. Turbiditas digunakan sebagai indikator dari kualitas air dan juga indikator dari efisiensi proses penyisihan seperti koagulasi dan filtrasi (Pizzi, 2011). Turbiditas dari air uji dikaitkan dengan kejernihannya. Turbiditas dalam air dapat disebabkan oleh senyawa organik maupun anorganik. Hal tersebut disebabkan oleh partikel yang tersuspensi seperti tanah liat, lumpur, pasir, lanau (butiran penyusun batuan), bahan makanan yang membusuk, kontaminan dari air limbah kota atau industri, senyawa pewarna organik, alga dan mikroorganisme lainnya (Vermani dan Narula, 1995).

Metode pengukuran turbiditas dari sulfat didasarkan pada fakta bahwa barium sulfat terbentuk dikarenakan adanya penambahan barium klorida ke dalam sampel yang cenderung mengendap kedalam bentuk koloid. Berdasarkan SNI tahun 2004 , ion sulfat bereaksi dengan barium klorida dalam kondisi asam (pH 4) akan membentuk suspensi barium sulfat dengan membentuk kristal barium sulfat yang sama besarnya diukur dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang 420 nm. Suasana asam ini dapat terjadi dengan penambahan larutan *buffer* asam yang mengandung magnesium klorida, potassium nitrat, sodium asetat dan asam asetat (Sawyer, 2003) .Reaksi yang terjadi :



2.5. Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1. Penelitian terdahulu

Referensi	Penelitian	Kondisi Operasi	Jenis Limbah yang dihilangkan	Hasil Penelitian
Murugunathan. M., G. Bhaskar Raju dan S. Prabhakar. 2004. <i>Removal of Sulfida, Sulfate, and Sulfite Ion by Electrocoagulation</i> . Chennai: <i>Journal of Hazardous Material</i> B109, 37-44	Pengaruh pH, kerapatan arus listrik, dan konsentrasi awal penyisihan ion sulfat menggunakan teknik elektrokoagulasi	$t = 1200$ s, $I = 12-62$ mA/cm ² , pH pada kondisi asam, netral, dan basa (5,5, 7, 8,5, 9,5, 10,5), elektroda Fe, Al, Ti	Ion sulfat pada limbah cair industri penyamakan kulit.	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan elektroda alumunium (anoda-katoda) dengan konfigurasi monopolar seri lebih efektif pada penyisihan kadar ion sulfat dibandingkan menggunakan elektroda titanium. • Efisiensi penyisihan sulfida lebih tinggi pada konsentrasi yang rendah dibandingkan sulfid dan sulfat. • Kerapatan arus listrik dengan nilai 62 mA/cm² dapat meningkatkan efisiensi penyisihan kadar ion sulfat hingga 90% • pH yang efektif yaitu pada kondisi asam (pH = 5,5)

<p>Mamelkina, Maria A., Salvador Cottilas dan Engracia Lacasa,. 2017. <i>Removal of Sulfate from Mining Waters by Electrocoagulation</i>. Albacete: <i>Separation and Purification Technology</i> 182, 87-93</p>	<p>Pengaruh pH dan perbandingan penyisihan kadar ion sulfat menggunakan metode koagulasi dan elektrokoagulasi</p>	<p>Waktu proses koagulasi = 1 jam, waktu proses elektrokoagulasi = 4 jam. Mode elektrokoagulasi bersifat <i>discontinuous</i>. Kondisi pH 2, 5, 7, 10</p>	<p>Kadar ion sulfat pada industri pertambangan</p>	<ul style="list-style-type: none"> • pada penyisihan kadar ion sulfur yang efektif pada pH 2,5. • Penyisihan kadar ion sulfat lebih efektif menggunakan proses elektrokoagulasi. • Pada metode koagulasi penyisihan kadar ion sulfat mencapai 80% apabila dosis besi yang digunakan rendah. • Pada arus 3 Ah/dm³, efisiensi penyisihan kadar ion sulfat yaitu sebesar 99,5%, sedangkan dengan arus 6 Ah/dm³ efisiensinya sebesar 77%. • Kerapatan arus listrik yang paling efisiensi 70 mA/cm³
<p>Trimurti, Aldo Zahviera dan Abyan Ilham. 2017. Pengaruh Variasi Konfigurasi Elektroda dan Tegangan dalam Menyisihkan Kromium (VI)</p>	<p>Pengaruh tegangan proses elektrokoagulasi dan konfigurasi penyusunan</p>	<p>Tegangan proses = 10V, 15V, 20V, 25V dan 30V. Konfigurasi penyusunan elektroda</p>	<p>Kromium (VI) dari Limbah Cair Industri Elektroplating</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Penyisihan kromium (VI) pada tegangan 30V paling optimum. • Nilai penyisihan kromium (VI) pada konfigurasi monopolar

<p>dari Limbah Cair Industri Elektroplating dengan Proses Elektrokoagulasi. Malang: Universitas Brawijaya</p>	<p>elektroda dalam penyisihan kadar kromium (Cr) menggunakan metode elektrokoagulasi</p>	<p>yaitu bipolar, monopolar seri dan monopolar paralel dengan menggunakan 2 pasang pelat elektrda.</p>		<p>seri lebih besar daripada konfigurasi monopolar paralel dan konfigurasi bipolar..</p>
<p>Sunarya, Ali, Elfridawati. 2013. Penggunaan Metode Elektrokoagulasi pada pendolahan Limbah Industri Penyamakan Kulit menggunakan Aluminium Sebagai <i>Sacrificial Anode</i>. Yogyakarta ; UPI press</p>	<p>Pengaruh pH, tegangan dan waktu operasi serta jarak elektroda dalam penyisihan kadar kromium (Cr) menggunakan metode elektrokoagulasi</p>	<p>Waktu proses = 2 ; 4 ; 6 ; 8 dan 10 menit. pH = 3, 4, 5, dan 7 , Tegangan 2 sampai 20 Volt , jarak atar elektroda = 2 ; 4 ; 6 ; dan 8 cm</p>	<p>Kadar kromium (Cr) pada limbah cair Industri Penyamakan Kulit.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Jarak antar elektroda yang optimum dalam penyisihan kadar Kromium adalah 2 cm pada saat pH 5. • Tegangan yang optimum untuk penurunan nilai absorbansi pada 17 Volt.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini jenis metodologi yang digunakan merupakan metode kuantitatif. Metode kuantitatif adalah metode yang dilakukan dengan cara mengumpulkan data, menganalisa data dan menampilkan data dalam bentuk kuantitatif untuk mendapatkan hasil variasi penelitian penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) menggunakan proses elektrokoagulasi.

3.1. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan pada :

Waktu : Bulan April - Juni 2018

Tempat : Laboratorium Sains Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.

3.2. Variabel Penelitian

3.2.1. Variabel Bebas

Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari :

1. Variasi nilai tegangan proses elektrokoagulasi yaitu 15 V, 20 V, 25 V, 30 V.
2. Variasi jarak antar pelat elektroda yang digunakan adalah 1 cm, 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75cm, dan 2 cm.

3.2.2. Variabel Kontrol

Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari :

1. Konsentrasi ion sulfat (SO_4^{2-}) pada larutan limbah sintetis sebesar 550 ppm.
2. Pasangan elektroda yang digunakan berupa Al/Al.
3. Konfigurasi penyusunan pasangan elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah monopolar seri.
4. Ukuran pelat elektroda Al yang digunakan pada percobaan ini dengan ukuran 10 cm x 4,5 cm x 0,03. Pelat elektroda Al terendam dengan ukuran 4,5 cm x 4,5 cm.
5. Lama waktu proses elektrokoagulasi selama 80 menit.

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1. Alat

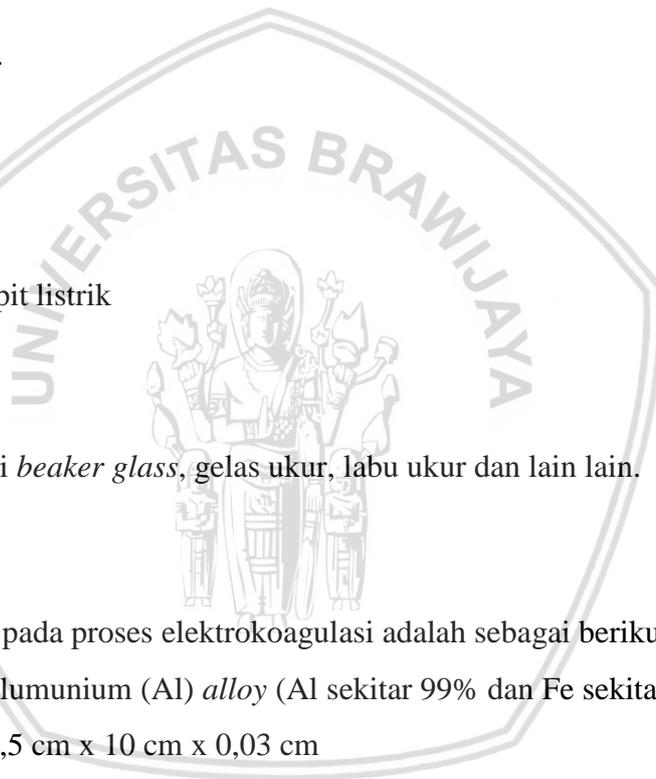
Alat-alat yang digunakan pada proses elektrokoagulasi adalah sebagai berikut :

- *Power supply Dekko PS 305 QS* ($\pm 0,01$)
- Neraca Analitik *Ohaus* ($\pm 0,0001$)
- *Indicator Universal*
- *Multimeter digital*
- *Statif Holder*
- Turbidimeter
- *Magnetic Stirrer*
- Oven
- Lemari Asam
- Desikator
- Kabel dan penjepit listrik
- Stopwatch
- Kertas Saring
- Alat gelas seperti *beaker glass*, gelas ukur, labu ukur dan lain lain.

3.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada proses elektrokoagulasi adalah sebagai berikut :

- Pelat elektroda aluminium (Al) *alloy* (Al sekitar 99% dan Fe sekitar 0,95%, dll) dengan ukuran 4,5 cm x 10 cm x 0,03 cm
- Padatan Na_2SO_4 p.a
- $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ p.a
- KNO_3 p.a
- $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ p.a
- CH_3COOH p.a
- BaCl_2
- Aseton
- HCl 1M
- Aquades

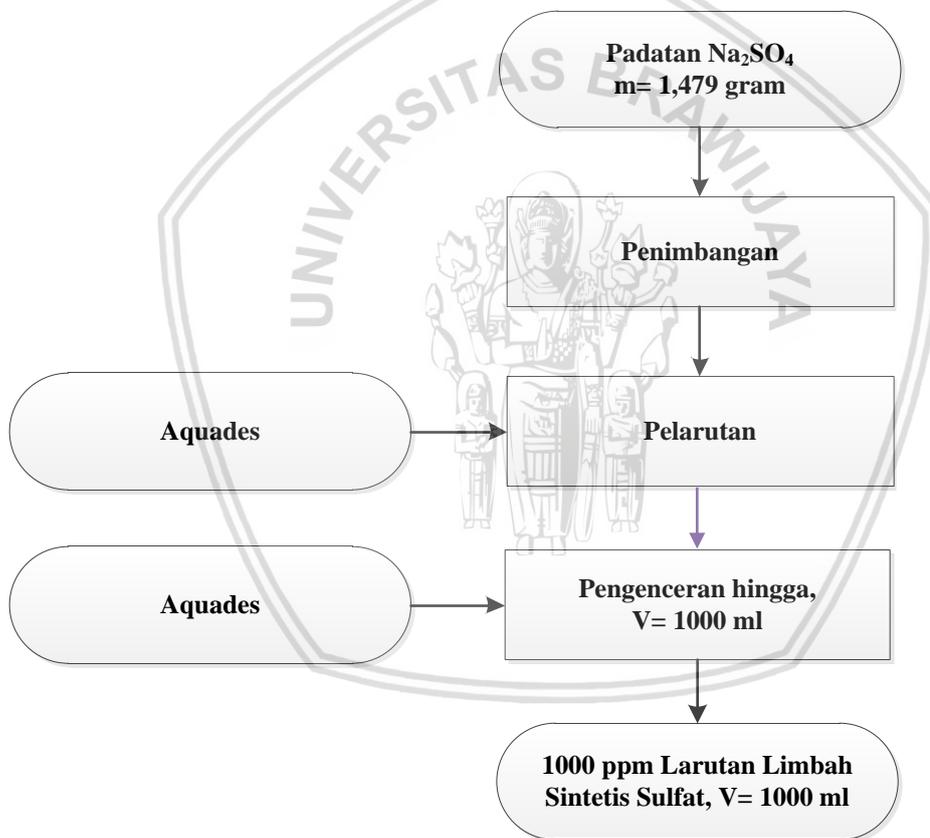


3.4. Prosedur Penelitian

Penelitian ini mengacu pada SNI-06-6989.20-2004- Cara Uji Sulfat, SO_4^{2-} secara Turbidimetri.

3.4.1. Proses Pembuatan Larutan Limbah Induk SO_4^{2-} Sintetis 1000 ppm

Larutan sulfat (SO_4^{2-}) sintetis dibuat dengan melarutkan 1,479 gram Na_2SO_4 dengan aquades, selanjutnya diencerkan hingga 1000 ml ke dalam labu ukur, sehingga didapatkan larutan sulfat sintetis berkonsentrasi 1000 ppm. Diagram alir pembuatan larutan dapat dilihat pada gambar 3.1.

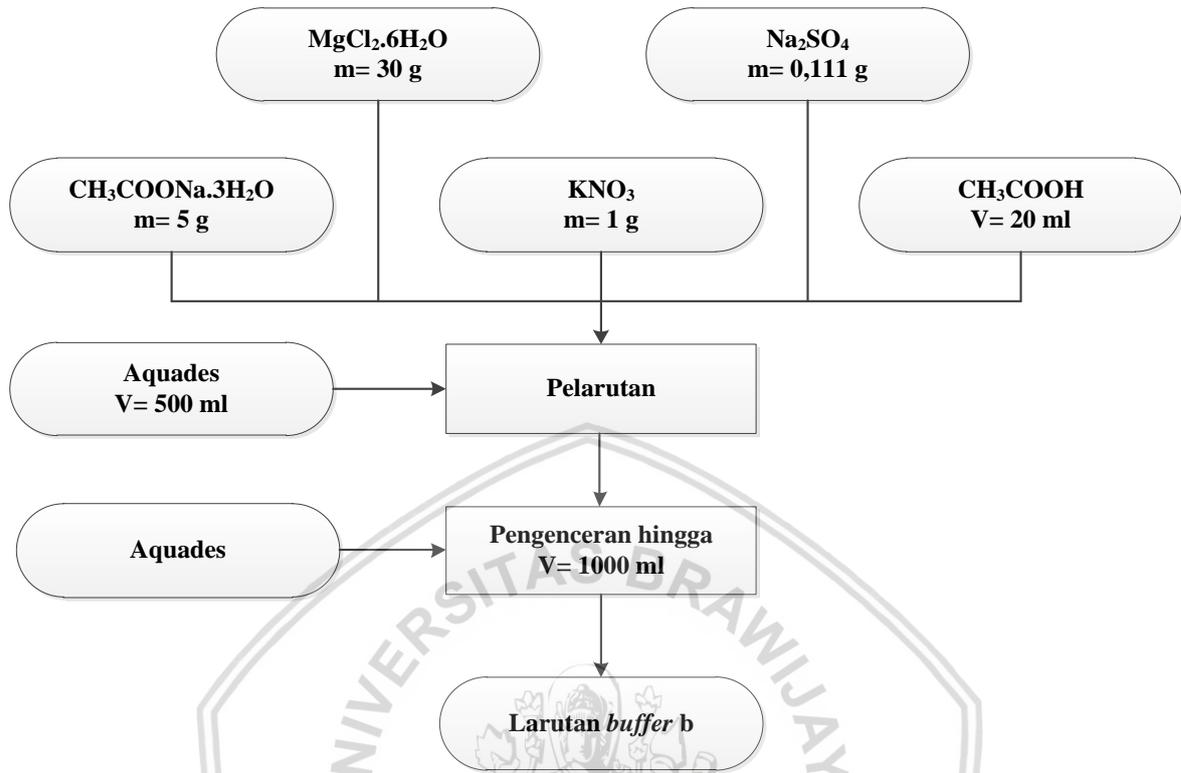


Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan larutan sulfat sintetis

3.4.2. Proses Pembuatan Larutan *Buffer b*

Larutan *buffer b* (pH 4) digunakan ketika sampel SO_4^{2-} memiliki konsentrasi dibawah 10 ppm. Larutan *buffer b* dibuat dengan melarutkan 30 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 5 g $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 1 g KNO_3 , 0,111 g Na_2SO_4 , dan 20 ml asam asetat (CH_3COOH 99%

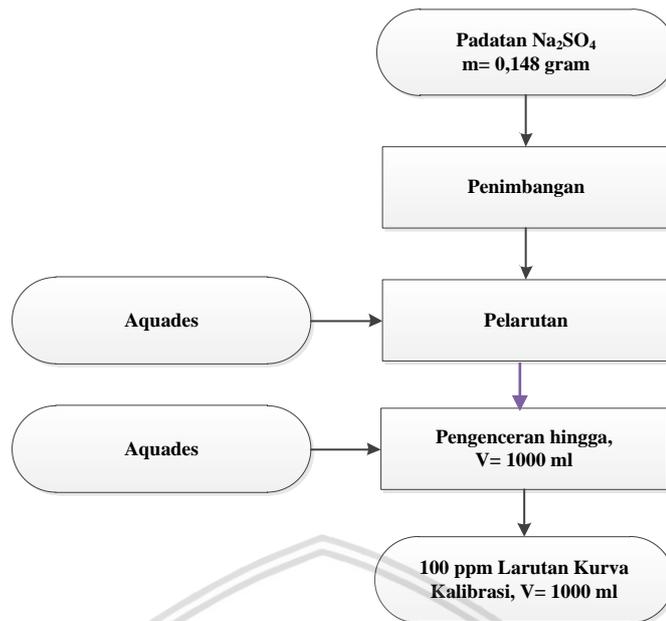
v/v) dengan 500 ml aquades dan diencerkan hingga 1000 mL ke dalam labu ukur. Diagram alir proses pembuatan larutan *buffer* b dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan larutan *buffer* b

3.4.3. Proses Pembuatan Larutan Kurva Kalibrasi

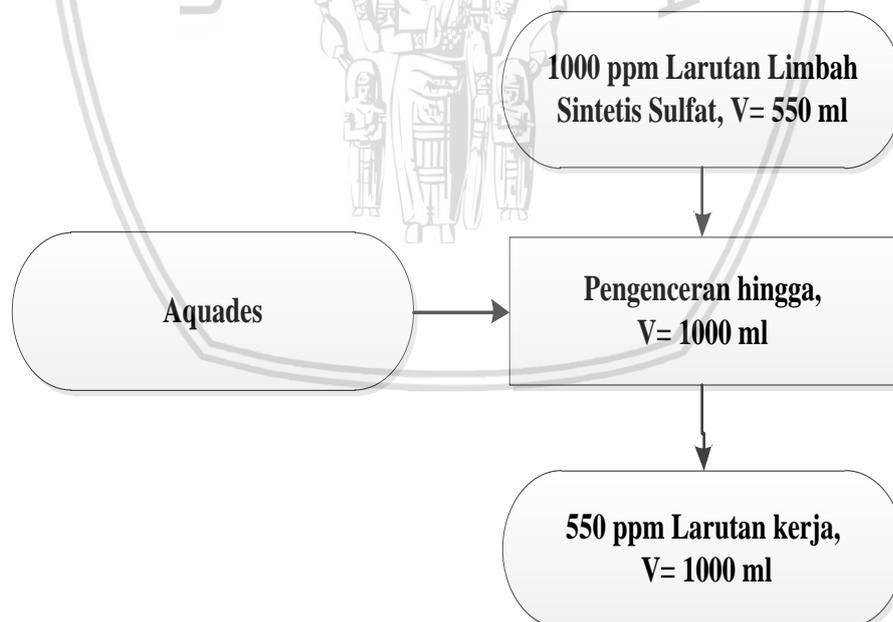
Larutan baku kurva kalibrasi dengan konsentrasi sulfat 100 ppm dibuat dengan menimbang Na_2SO_4 sebesar 0,148 gram dan dilakukan pengenceran hingga 1000 ml ke dalam labu ukur dengan aquades.



Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan larutan kurva kalibrasi

3.4.4. Proses Pembuatan Larutan Kerja Limbah SO_4^{2-} Sintetis 550 ppm

Larutan kerja SO_4^{2-} 550 ppm dibuat dengan mengambil 550 ml larutan limbah induk 1000 ppm dan selanjutnya diencerkan dengan aquades hingga 1000 ml ke dalam labu ukur.

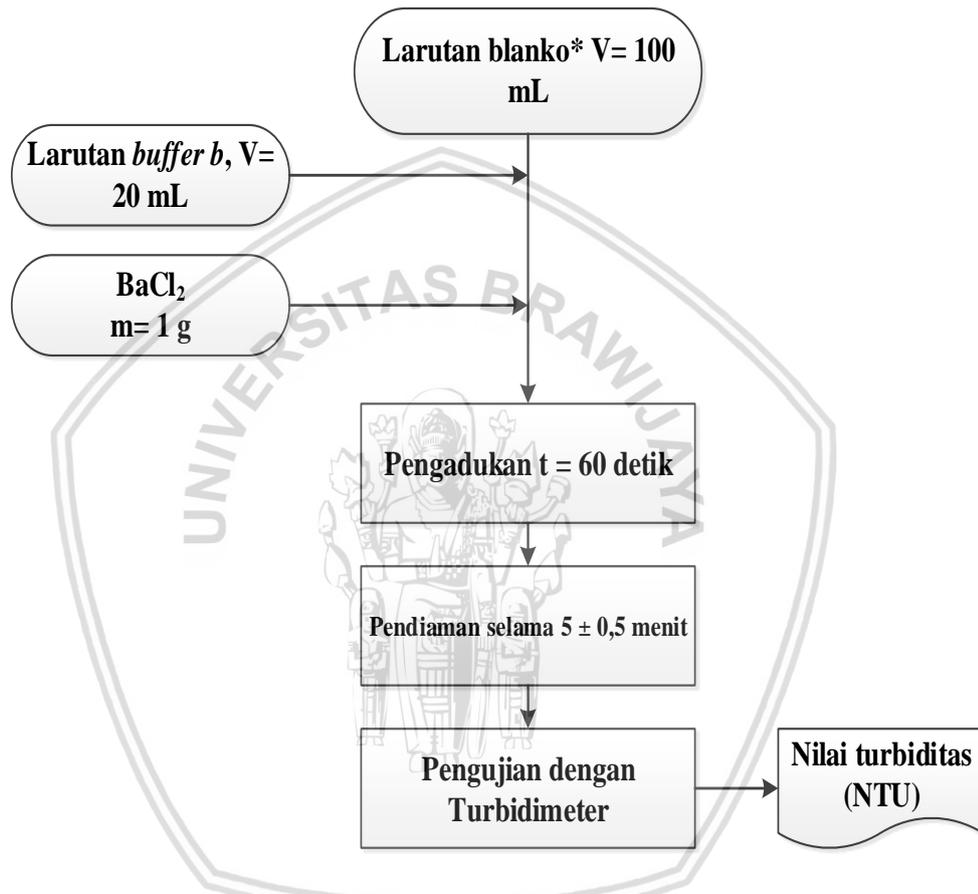


Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan larutan kerja

3.4.5. Pembuatan Kurva Kalibrasi Turbidimeter

Untuk membuat kurva kalibrasi, digunakan larutan sulfat pada konsentrasi 0 ppm (blanko), 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm, 5 ppm dan 6 ppm dengan mengencerkan larutan

kurva kalibrasi 100 ppm hingga 100 ml ke dalam labu ukur . Larutan yang akan digunakan sebagai kurva kalibrasi akan ditambahkan dengan larutan *buffer* b sebanyak 20 ml dan BaCl_2 sebanyak 1 gram, selanjutnya diuji nilai turbiditas (NTU) dengan menggunakan turbidimeter. Diagram alir pembuatan kurva kalibrasi dapat dilihat pada gambar 3.4. Nilai NTU yang didapatkan akan digunakan untuk membentuk grafik kurva kalibrasi dengan notasi y = nilai NTU dan x = konsentrasi larutan kurva kalibrasi, dari grafik tersebut akan didapatkan persamaan $y = ax + b$.



Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan kurva kalibrasi

*Diulangi dengan menggunakan larutan sulfat pada konsentrasi 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm, 5 ppm , dan 6 ppm.

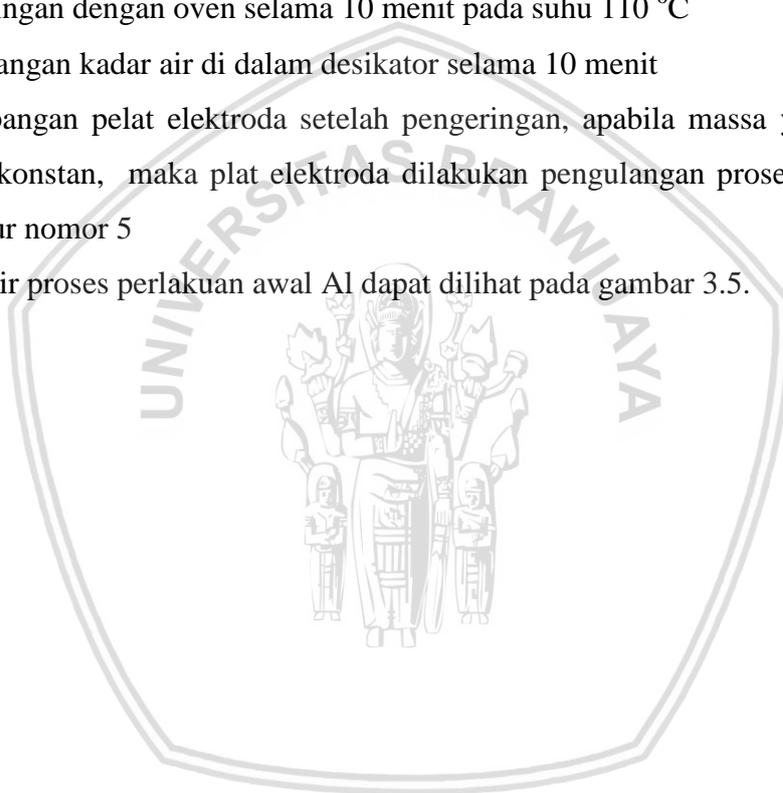
3.4.6. Proses Perlakuan Awal Pelat Elektroda

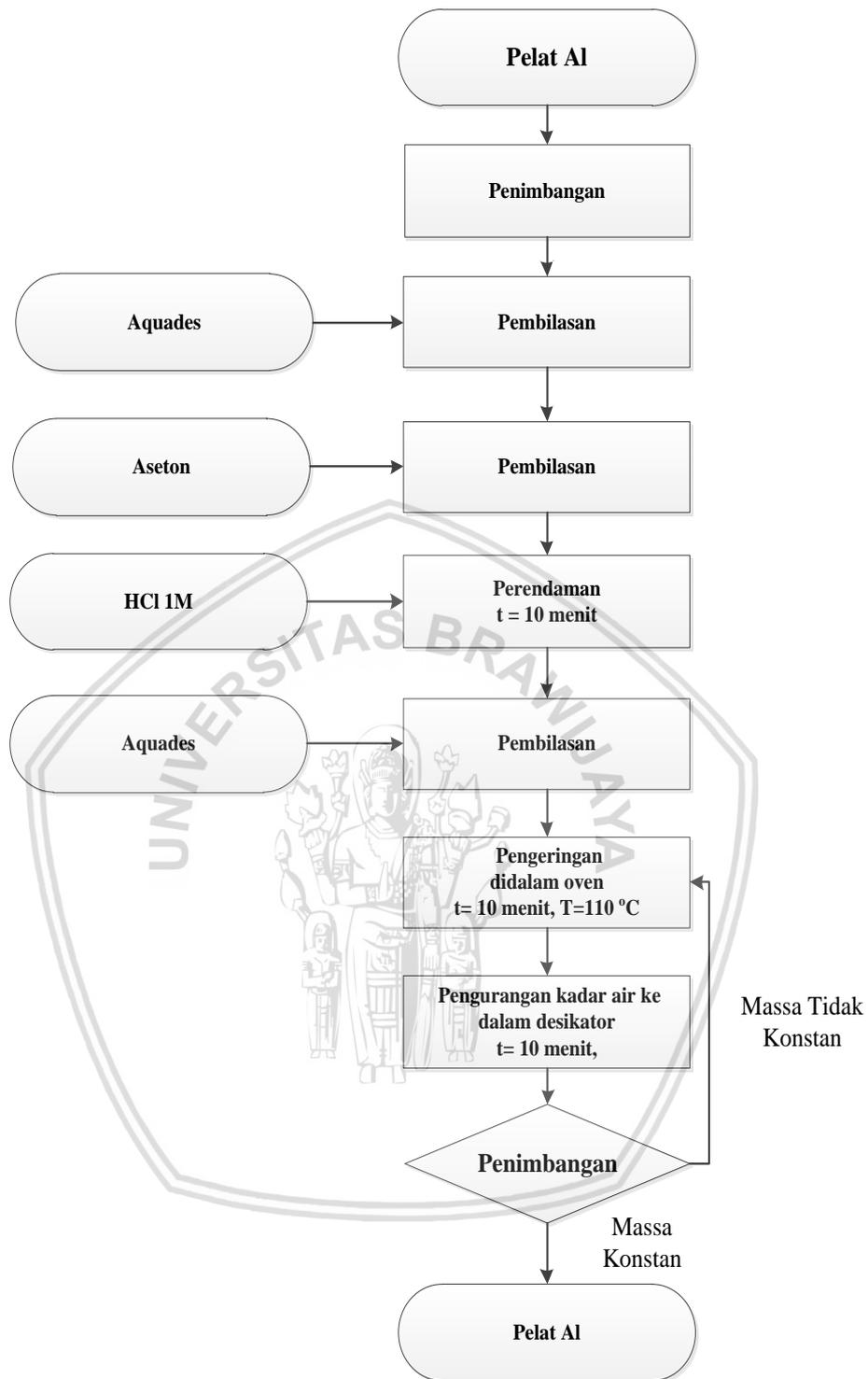
Pada proses elektrokoagulasi, plat yang digunakan adalah elektroda berupa Al/Al karena pada penelitian El-Naas dkk (2009), penggunaan elektroda aluminium lebih jauh efektif, dengan pengurangan sulfat 2,5 kali lebih besar dibandingkan dengan menggunakan elektroda berupa *stainless stell* dan besi. Selain itu, elektroda aluminium lebih cepat untuk membentuk aluminium sulfat dibandingkan dengan elektroda lainnya. Sebelum

aluminium digunakan pada proses elektrokoagulasi, pelat aluminium dilakukan perlakuan awal dengan cara diampas terlebih dahulu. Hal ini dilakukan supaya tidak ada komponen lain yang bereaksi (Sunarya, 2013), pelat elektroda berupa Al yang telah diampas selanjutnya akan mengalami *pretreatment*. Adapun proses *pretreatment* pelat Al adalah sebagai berikut :

1. Pemotongan pelat Al menjadi berukuran 4,5 cm x 10 cm
2. Pembilasan pelat dengan aquades
3. Pembilasan pelat dengan aseton
4. Pelat direndam dengan HCl 1M selama 10 menit untuk penghilangan karat
5. Pengeringan dengan oven selama 10 menit pada suhu 110 °C
6. Pengurangan kadar air di dalam desikator selama 10 menit
7. Penimbangan pelat elektroda setelah pengeringan, apabila massa yang dihasilkan belum konstan, maka plat elektroda dilakukan pengulangan prosedur kembali ke prosedur nomor 5

Diagram alir proses perlakuan awal Al dapat dilihat pada gambar 3.5.





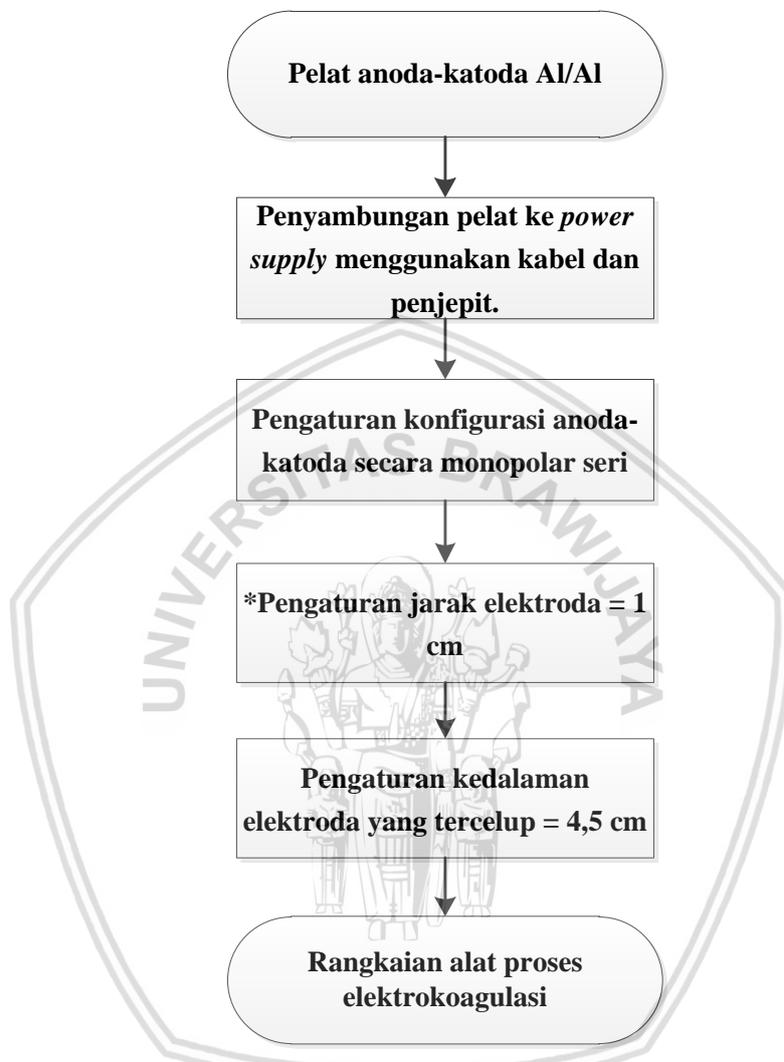
Gambar 3.6 Diagram alir proses perlakuan awal pelat aluminium

3.4.7. Perangkaian Alat Sistem Elektrokoagulasi

Penyusunan rangkaian peralatan Elektrokoagulasi adalah sebagai berikut :

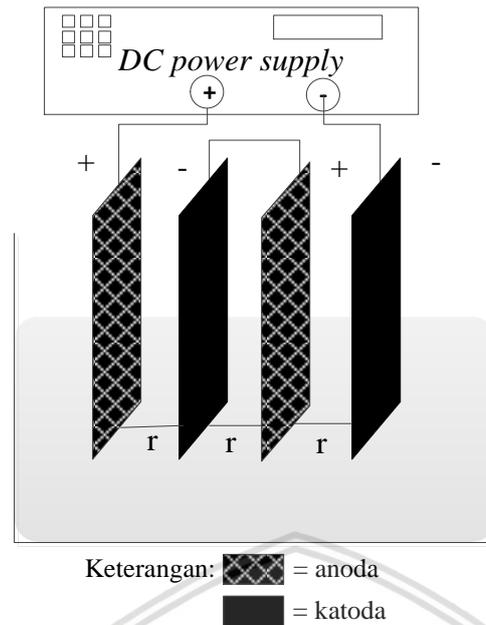
1. Penyambungan pelat elektroda pada *power supply* menggunakan kabel dan penjepit.

2. Pengaturan konfigurasi anoda-katoda secara monopolar seri.
3. Jarak antar elektroda diatur sejauh 1 cm, 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm dan 2 cm menggunakan *statif* dan *holder*.
4. Elektroda yang terendam dengan kedalaman 4,5 cm.



Gambar 3.7 Diagram alir perangkaian alat proses elektrokoagulasi

*prosedur diulangi dengan jarak elektroda sejauh 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm dan 2 cm .

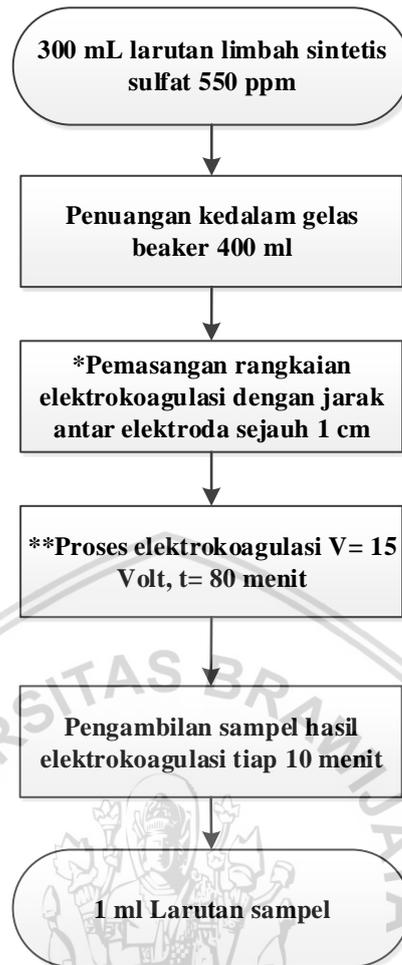


Gambar 3.8 Rangkaian alat elektrokoagulasi dengan konfigurasi monopolar seri

3.4.8. Proses Elektrokoagulasi

Adapun tahap proses elektrokoagulasi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menuangkan 250 ml larutan kerja ion sulfat (SO_4^{2-}) 550 ppm ke dalam *beaker glass* 400 ml.
2. Pemasangan rangkaian elektrokoagulasi dengan konfigurasi monopolar seri.
3. Pelat Al berukuran 10 cm x 4,5 cm dimasukkan ke dalam larutan sulfat dengan ukuran pelat yang terendam 4,5 cm x 4,5 cm.
4. Jarak antar elektroda diatur sejauh 1 cm.
5. Pengaktifan dan pengaturan *power supply* dengan tegangan sebesar 15V.
6. Proses elektrokoagulasi dilakukan selama 80 menit.
7. Prosedur diulangi dengan variasi jarak antar elektroda sejauh 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm dan 2 cm.
8. Prosedur diulangi dengan variasi tegangan 20V, 25V, 30V.



*pengulangan dengan jarak antar elektroda sejauh 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm dan 2 cm.

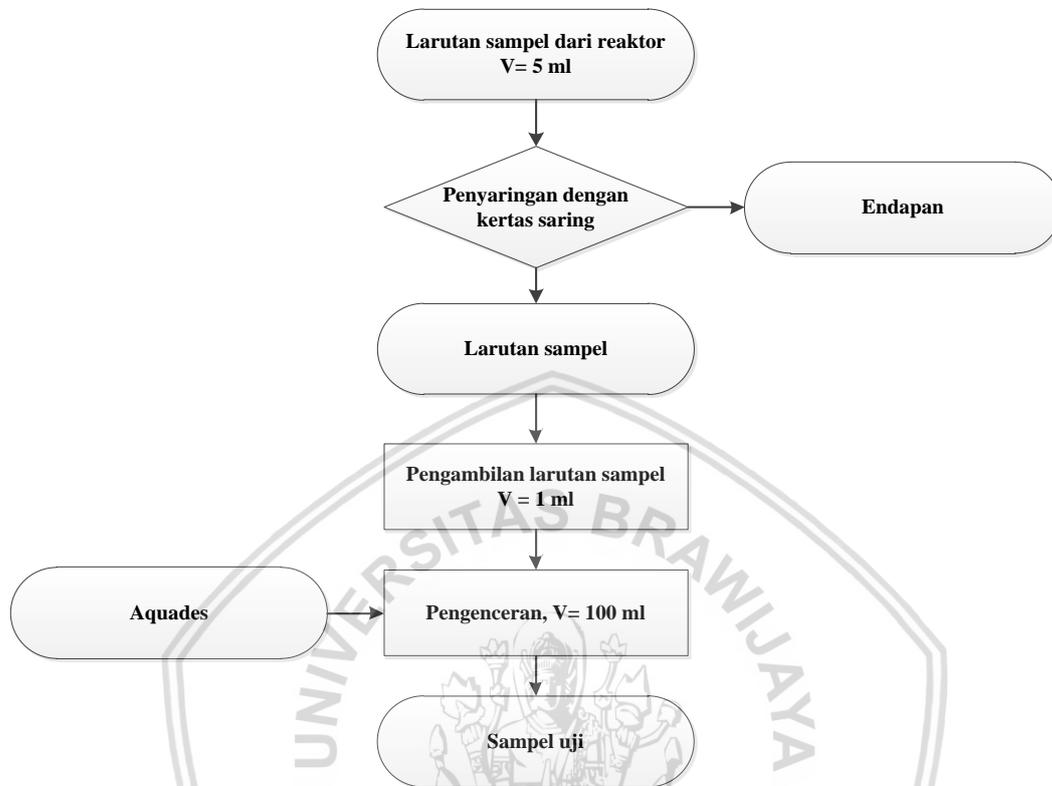
**pengulangan dengan menggunakan tegangan 20V, 25V, 30V.

Gambar 3.9 Diagram alir proses elektrokoagulasi

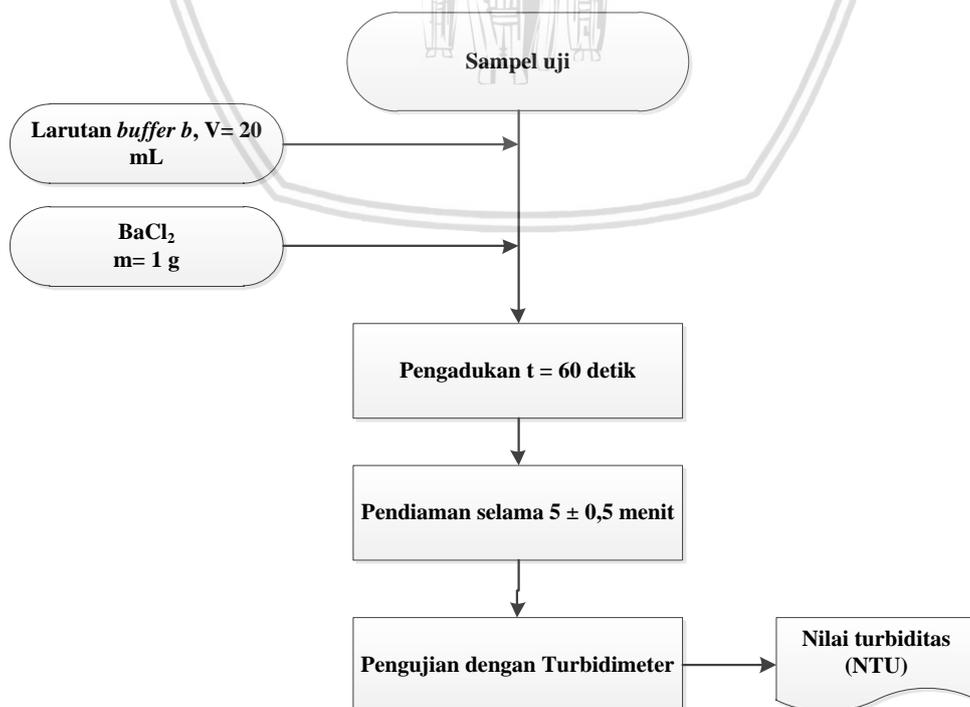
3.4.9. Analisa Kadar Ion Sulfat (SO_4^{2-}) dengan Turbidimeter

Berdasarkan SNI 06-6989.15-2004 mengenai cara uji sulfat SO_4^{2-} secara turbidimetri, analisa kadar ion sulfat dengan turbidimeter dilakukan dengan cara mengambil 1 ml sampel yang diencerkan hingga 100 ml dan selanjutnya dimasukkan ke dalam gelas erlenmayer 250 ml. Perlu diketahui bahwa sebelum dilakukan analisa sulfat menggunakan turbidimeter, limbah cair tersebut disaring terlebih dahulu dikarenakan ketika proses elektrokoagulasi semakin lama, maka terbentuk endapan putih yang semakin banyak dan dapat mengganggu hasil analisa sulfat jika tidak disaring terlebih dahulu. Selanjutnya pada saat analisa dengan turbidimeter, penambahan *buffer b* akan menyebabkan nilai pH sampel turun menjadi 4, hal ini bertujuan agar ion sulfat bereaksi dengan BaCl_2 untuk membentuk BaSO_4 . Penambahan 20 ml larutan *buffer* dan 1 gr kristal BaCl_2 ke dalam larutan sampel, diaduk selama 60 detik pada kecepatan yang tetap. Sampel yang telah diaduk harus

didiamkan terlebih dahulu selama kurang lebih $5 \pm 0,5$ menit setelah penambahan barium klorida untuk mendapatkan suspensi yang stabil.



Gambar 3.10 Diagram alir pengenceran larutan sampel

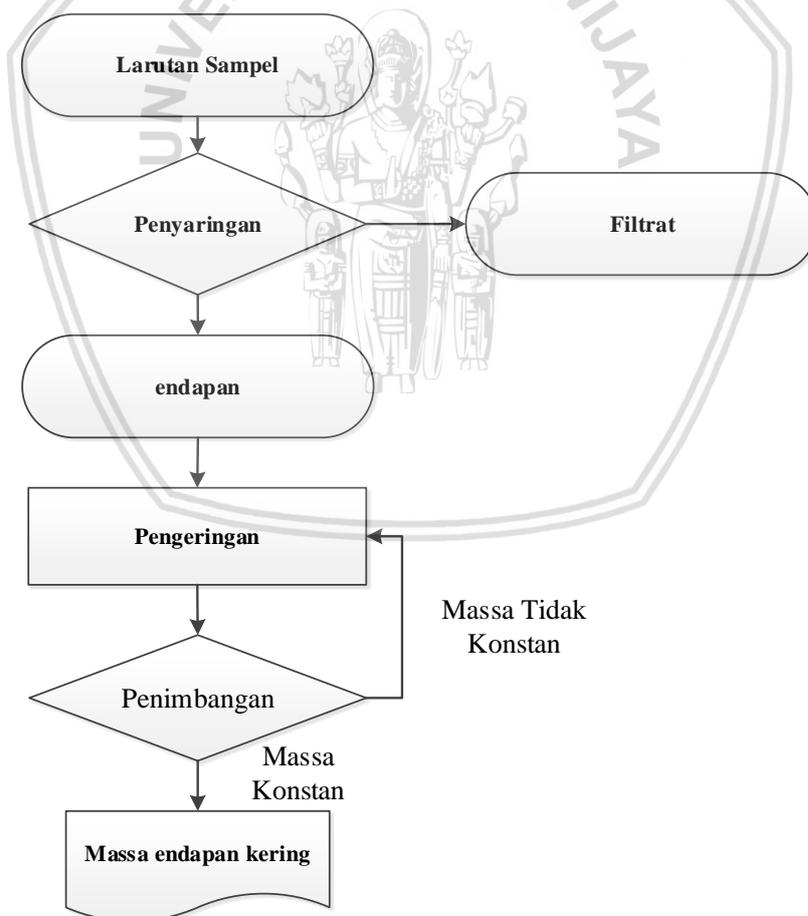


Gambar 3.11 Diagram alir penentuan nilai NTU

Hasil dari pengujian nilai turbiditas (NTU) selanjutnya akan digunakan untuk mendapatkan konsentrasi ion sulfat yang tersisihkan. Persamaan linier $y = ax + b$ yang didapatkan dari persamaan pada kurva kalibrasi dengan y adalah nilai NTU dan x merupakan konsentrasi ion sulfat, maka konsentrasi ion sulfat yang tersisa dapat ditentukan.

3.4.10. Pengukuran Massa Endapan Setelah Elektrokoagulasi

Pengukuran massa endapan akan dilakukan setelah proses elektrokoagulasi. Sampel didiamkan hingga beberapa saat hingga endapan terlihat di dasar *beaker glass*. Sampel akan disaring menggunakan kertas saring. Massa endapan didapat berdasarkan selisih massa dari kertas saring mula-mula dan kertas saring yang telah digunakan untuk menyaring endapan. Kertas saring yang telah digunakan akan dikeringkan terlebih dahulu pada *oven* dan dimasukkan ke dalam desikator sebelum dilakukan penimbangan dengan neraca analitik.



Gambar 3.12 Diagram alir pengukuran massa endapan

3.4.11. Pengukuran Perubahan Massa Pelat Elektroda

Pengukuran perubahan massa pelat elektroda dilakukan dengan menggunakan neraca analitik. Pengukuran perubahan massa pelat elektroda akan dilakukan dengan menghitung selisih massa setelah dan sebelum proses elektrokoagulasi. Pelat akan dikeringkan dan dibersihkan terlebih dahulu sebelum proses penimbangan.













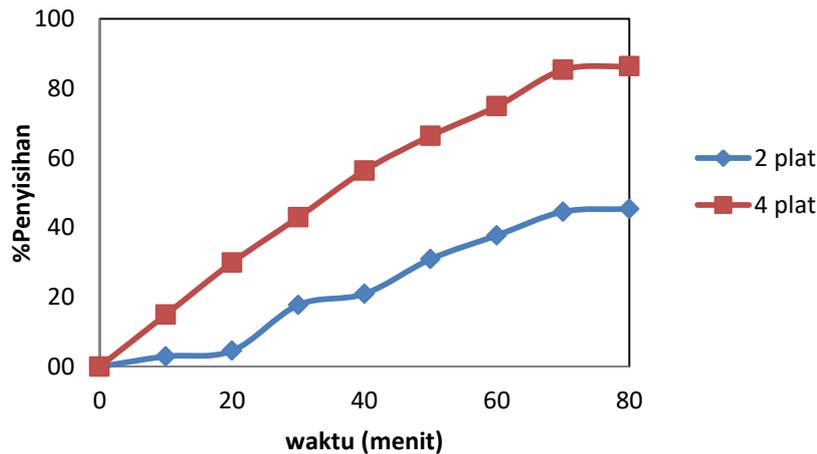
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh Tegangan Terhadap Penyisihan Ion Sulfat (SO_4^{2-})

Penelitian ini difokuskan pada pengaruh tegangan yang diberikan untuk menyisihkan ion sulfat pada limbah cair sintesis dengan konsentrasi sebesar 550 ppm dengan menggunakan teknik elektrokoagulasi. Adapun jenis elektroda yang digunakan adalah Al/Al (anoda-katoda), karena menurut penelitian oleh Muruganathan tahun 2004 mengatakan bahwa untuk penyisihan ion sulfat memiliki persentase yang lebih baik menggunakan aluminium sebagai elektroda dibanding menggunakan besi. Selain itu, aluminium juga tidak mudah terkorosi, endapan yang dihasilkan tidak beracun dan ramah lingkungan.

Penyisihan ion sulfat dilakukan dengan plat sebanyak 4 buah dikarenakan sebelumnya telah dilakukan uji untuk mengetahui seberapa besar pengaruh jumlah plat yang digunakan terhadap nilai persentase penyisihan ion sulfat pada limbah cair dengan menggunakan teknik elektrokoagulasi. Hasilnya ditunjukkan pada gambar 4.1, ketika menggunakan jumlah plat sebanyak 2 buah, nilai persentase penyisihan hanya 45,3%, sedangkan pada penggunaan 4 plat aluminium dengan konfigurasi monopolar seri memiliki nilai persentase penyisihan sebesar 86,3% selama 80 menit proses elektrokoagulasi. Apabila jumlah elektroda meningkat, maka luas area semakin besar sehingga hambatan akan semakin rendah (sesuai dengan persamaan (2-30)), ketika hambatan rendah, maka kerapatan arus listrik yang mengalir semakin tinggi dan peningkatan efisiensi meningkat. Ketika 2 plat digunakan pada proses elektrokoagulasi, efisiensi penyisihan yang dihasilkan lebih rendah dikarenakan menurut Eyvaz dkk., (2014) apabila jumlah elektroda yang digunakan pada proses elektrokoagulasi hanya berjumlah 2 plat, maka dibutuhkan kerapatan arus listrik yang tinggi dengan tegangan yang sama dikarenakan nilai luas permukaan area yang terendam lebih rendah sehingga hambatan di dalam larutan semakin tinggi pada saat proses elektrokoagulasi. Sehingga peningkatan jumlah plat yang digunakan, dapat meningkatkan pula nilai persentase penyisihan ion sulfat. Selanjutnya pada penelitian ini, jumlah plat yang digunakan sebanyak 4 plat Al/Al dengan konfigurasi elektroda monopolar seri serta variasi nilai tegangan 15 V, 20 V, 25 V, dan 30 V selama 80 menit dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh tegangan terhadap pembentukan flok sehingga dapat mempengaruhi nilai efisiensi dari penyisihan ion sulfat.



Gambar 4.1 Grafik antara perbandingan persentase penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan perbedaan jumlah plat yang digunakan

Proses elektrokoagulasi membutuhkan waktu karena berdasarkan tahap-tahap elektrokoagulasi Pada anoda, mula-mula logam aluminium akan teroksidasi menjadi ion aluminium (Al^{3+}). Sementara pada katoda menurut Shalaby, dkk., (2014) air akan tereduksi membentuk gugus hidroksil (OH^-). Selanjutnya ion aluminium akan bereaksi dengan gugus hidroksil menjadi beberapa senyawa aluminium hidroksil yang dipengaruhi oleh pH larutan. Berdasarkan gambar 2.4 penelitian yang dilakukan oleh Bilyeu dkk., (2018) menunjukkan bahwa pada rentang kondisi pH 4 hingga 9 senyawa hidroksil yang terbentuk berupa $\text{Al}(\text{OH})_3$. Namun, ketika pH 10 hingga pH 14, akan terbentuk senyawa hidroksil berupa $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ dimana senyawa ini tidak efektif untuk mengkoagulasi polutan. Akibat adanya reaksi reduksi dan oksidasi pada elektroda, maka akan meningkatkan pH larutan sebagaimana yang teramati mula-mula bernilai 6 menjadi 9 diakhir proses elektrokoagulasi. Kenaikkan nilai pH diakibatkan adanya gugus OH^- yang terbentuk dari reduksi H_2O didalam limbah cair. Tahap selanjutnya $\text{Al}(\text{OH})_3$ akan menjadi koagulan yang berfungsi menangkap (adsorpsi) suspensi atau polutan (ion sulfat) dengan mekanisme koagulasi secara adsorpsi dan pembentukan jembatan antar partikel serta *sweep coagulation*. Berdasarkan teori dari Metcalf (2003), polutan akan teradsorpsi ke sisi aktif permukaan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan selanjutnya akan membentuk flok yang lebih besar dan mengendap.

Penelitian penyisihan ion sulfat dengan menggunakan teknik elektrokoagulasi menggunakan variabel tegangan 15 V, 20 V, 25 V, dan 30 V selama 80 menit dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh tegangan terhadap pembentukan flok sehingga dapat mempengaruhi nilai persentase dari penyisihan ion sulfat. Dari gambar 4.2

secara keseluruhan, dapat dilihat bahwa persentase penyisihan ion sulfat pada tegangan yang tertinggi menunjukkan jumlah persentase penyisihan yang paling tinggi dibandingkan dengan tegangan lainnya pada jarak yang sama. Sesuai dengan tabel 4.1, tegangan yang semakin tinggi menyebabkan kerapatan arus listrik semakin meningkat sehingga menaikkan pula laju disolusi anoda dan koagulan yang terbentuk semakin banyak yang akibatnya laju daripada penyisihan polutan meningkat sesuai pada data massa anoda aluminium yang larut dan massa endapan yang terbentuk pada tabel 4.1. Selain itu apabila tegangan diperbesar maka terjadi peningkatan perpindahan massa ion aluminium dan penyisihan polutan lebih cepat disertai adanya proses pengapungan, hal ini diindikasikan dengan adanya gelembung-gelembung yang terbentuk pada saat proses elektrokoagulasi (El-Naas, 2009).

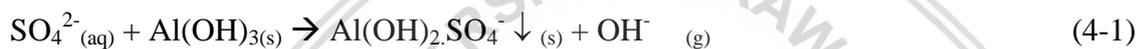
Tabel 4.1 Data hasil penelitian elektrokoagulasi pada penyisihan ion sulfat dalam limbah cair menggunakan elektroda Al/Al

No	Jarak (cm)	Tegangan (V)	Kerapatan Arus listrik (mA/cm ²)	massa anoda Al yang larut (gr)	Massa Endapan (gr)
1	1	15	4.9	0,01	0,12
2		20	5.1	0,01	0,15
3		25	5.6	0,03	0,29
4		30	9.3	0,1	0,49
5	1,25	15	4.9	0,01	0,1
6		20	5.1	0,01	0,14
7		25	5.4	0,07	0,27
8		30	7.1	0,09	0,35
9	1,5	15	3.7	0,02	0,11
10		20	4.4	0,02	0,14
11		25	4.9	0,04	0,25
12		30	6.3	0,06	0,32
13	1,75	15	3.4	0,02	0,1
14		20	4.4	0,05	0,13
15		25	4.9	0,05	0,25
16		30	6.1	0,05	0,3
17	2	15	2.4	0,02	0,09
18		20	4.4	0,03	0,13
19		25	4.9	0,03	0,17
20		30	5.4	0,05	0,28

*pH awal 6, pH akhir 9

Pada gambar 4.2, grafik tersebut menunjukkan, secara umum pada 10 menit awal proses elektrokoagulasi, efisiensi penyisihan ion sulfat masih dibawah 25%. Pada waktu tersebut, proses elektrokoagulasi masih pada tahap pembentukan koagulan. Selanjutnya

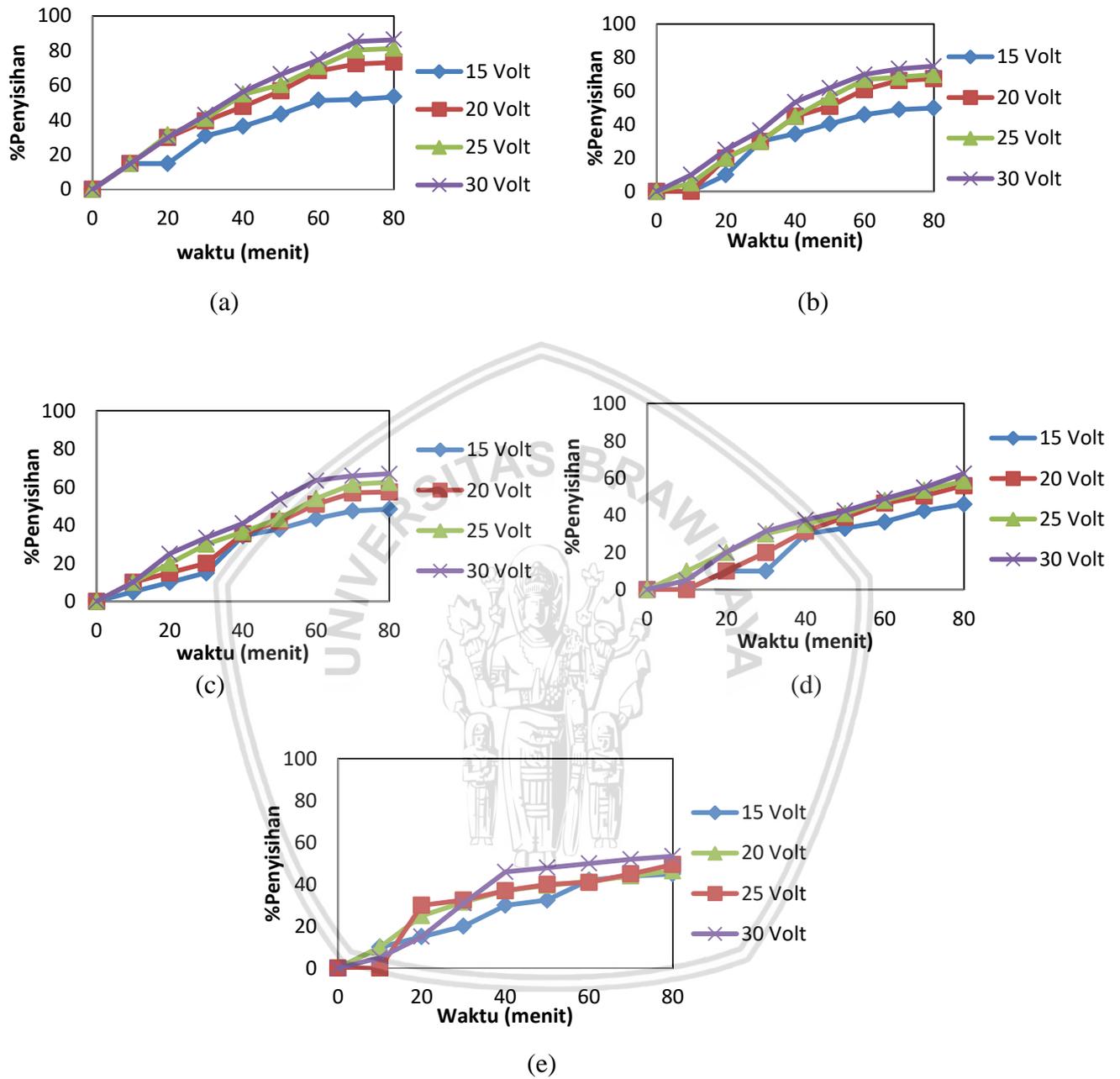
pada menit ke-20 hingga menit ke-60, persentase penyisihan sudah mengalami peningkatan dalam rentang 5% hingga 10% secara bertahap. Seiring bertambahnya waktu elektrokoagulasi, maka terjadi pula peningkatan persentase penyisihan ion sulfat dikarenakan sudah memasuki tahap koagulasi kontaminan. Menurut penelitian yang dilakukan Miguel (2017), aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) akan mengikat (adsorpsi) ion SO_4^{2-} . Menurut penelitian Chen dkk tahun 2000 mengatakan bahwa anion SO_4^{2-} yang terdapat didalam limbah cair akan mengakibatkan pertukaran ion antara OH^- dari koagulan ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dengan SO_4^{2-} sehingga akan melepas OH^- , sesuai pada persamaan berikut (4-1). Kontaminan (SO_4^{2-}) yang telah terperangkap di permukaan koagulan akan membentuk flok ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{SO}_4^-$) yang akan mengendap ke dasar reaktor. Adapun efek dari OH^- yang terlepas akan meningkatkan pH didalam sistem, sesuai yang teramati pada penelitian ini, pH mula-mula yaitu 6 dan pada akhir elektrokoagulasi pH meningkat hingga bernilai 9 (sesuai pada table 4.1). Berikut merupakan reaksi pengikatan SO_4^{2-} (Miguel, 2017) :



Adapun nilai E° sel yang dihitung pada proses ini yaitu sebesar -2,49 V. Nilai tersebut menunjukkan reaksi elektrokimia yang tidak spontan, sehingga reaksi ini akan terjadi ketika adanya pemberian tegangan dari luar sistem.

Semakin lama proses elektrokoagulasi, maka semakin banyak pula koagulan aluminium hidroksil dan flok yang terbentuk. Pada menit ke-70 hingga ke-80, peningkatan persentase penyisihan mulai stabil. Sehingga dapat dikatakan bahwa, semakin lama waktu proses elektrokoagulasi, maka persentase penyisihan ion sulfat akan semakin meningkat dan stabil. Adapun yang menyebabkan pada menit tersebut persentase penyisihan ion sulfat yang stabil disebabkan kerapatan arus listrik yang mengalir sudah semakin menurun dikarenakan partikel yang terbentuk semakin besar dan meningkatkan hambatan pada sistem elektrokoagulasi.

Gambar 4.2(a) juga menunjukkan bahwa persentase penyisihan ion sulfat dengan tegangan 30 V memiliki nilai yang tertinggi yaitu sebesar 86,3% dibandingkan dengan nilai tegangan lainnya. Hal ini juga terjadi pada jarak yang lain, bahwa nilai tegangan 30 V memiliki nilai efisiensi yang tertinggi. Sementara ketika menggunakan nilai tegangan 15 V, nilai persentase penyisihan ion sulfat paling rendah.



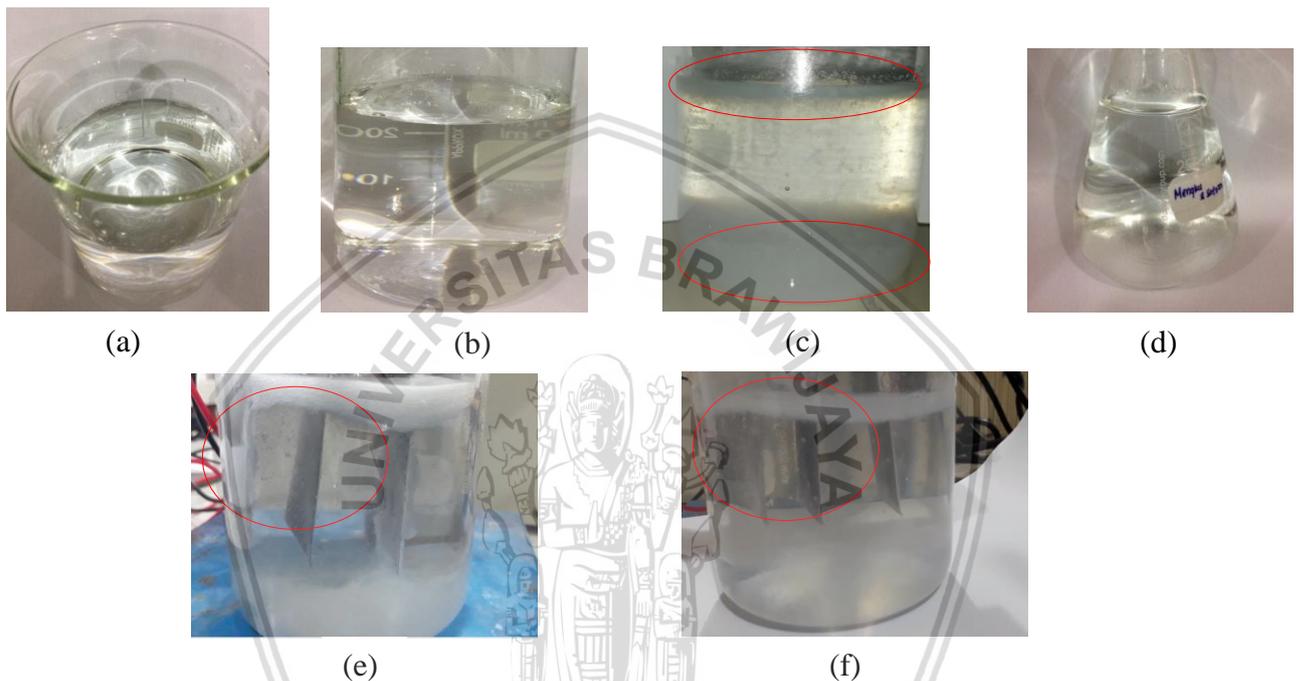
Gambar 4.2 Grafik antara perbandingan persentase penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan variasi tegangan pada proses elektrokoagulasi dengan jarak antara elektroda (a) 1 cm, (b) 1,25 cm, (c) 1,5 cm, (d) 1,75 cm, (e) 2 cm.

Tabel 4.2 Data hasil perhitungan jumlah gas gelembung oksigen dan hidrogen yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi.

No	Jarak (cm)	Tegangan (V)	Kerapatan Arus listrik (mA/cm ²)	Jumlah gas gelembung yang terbentuk (mL/s)
1	1	15	4.9	0,035
2		20	5.1	0,037
3		25	5.6	0,040
4		30	9.3	0,066
5	1,25	15	4.9	0,035
6		20	5.1	0,037
7		25	5.4	0,038
8		30	7.1	0,050
9	1,5	15	3.7	0,026
10		20	4.4	0,031
11		25	4.9	0,035
12		30	6.3	0,045
13	1,75	15	3.4	0,024
14		20	4.4	0,031
15		25	4.9	0,035
16		30	6.1	0,044
17	2	15	2.4	0,017
18		20	4.4	0,031
19		25	4.9	0,035
20		30	5.4	0,038

Pada gambar 4.3 menunjukkan larutan limbah sulfat mula-mula berwarna bening (gambar 4.3a dan 4.3b), setelah mengalami proses elektrokoagulasi selama 80 menit, warna larutan berubah menjadi lebih keruh. Hal ini menandakan telah terjadi disolusi logam aluminium di dalam limbah cair menjadi ion aluminium (Al^{3+}) yang dihasilkan dari anoda. Dapat dilihat pada gambar 4.3c terdapat 2 lapisan warna yang berbeda, untuk lapisan paling atas dikarenakan adanya flok yang mengapung akibat dorongan dari gas hidrogen dan oksigen yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi, namun tidak semua flok dapat terdorong ke permukaan larutan karena tidak sebandingnya dengan jumlah gas gelembung yang terbentuk. Perhitungan pembentukan gas gelembung dapat dilihat pada tabel 4.2, semakin besar tegangan yang diberikan maka kerapatan arus listrik juga meningkat sehingga gelembung gas yang dihasilkan semakin tinggi hal ini sesuai dengan teori Gupta dan Ali (2013) yang dapat menghitung jumlah laju pembentukan gelembung gas dengan menggunakan persamaan yang dikembangkan dari hukum faraday. Sementara lapisan dibagian bawah juga merupakan flok yang telah mengendap ke dasar reaktor

elektrokoagulasi. Berdasarkan pengamatan, pada akhirnya, semua flok akan mengendap ke dasar reaktor dikarenakan kerapatan arus listrik yang mengalir pada proses elektrokoagulasi terhenti sehingga berhenti pula proses flotasi. Hal ini terjadi karena aluminium hidroksida memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi dan berupa koloid yang tersuspensi, oleh karena itu aluminium hidroksida yang sudah berikatan dengan polutan akan mengendap sehingga dapat dipisahkan dengan metode filtrasi (Abdel-Fatah dkk, 2015).



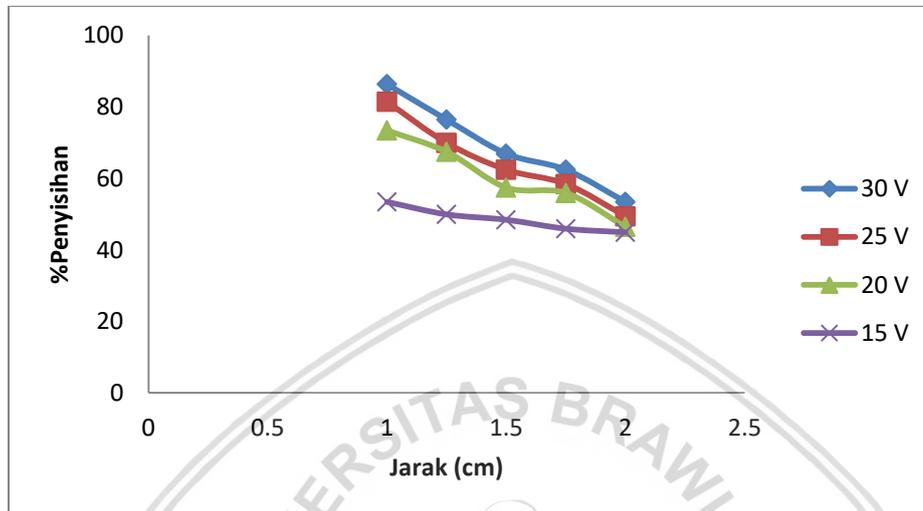
Gambar 4.3 Larutan limbah sintesis yang mengandung ion sulfat (a) sebelum elektrokoagulasi tampak atas, (b) sebelum elektrokoagulasi tampak samping, (c) setelah elektrokoagulasi, (d) setelah penyaringan, (e) pembentukan gelembung pada tegangan 30V dan (f) pembentukan gelembung pada tegangan 15V.

4.2. Pengaruh Jarak Antar Elektroda Terhadap Penyisihan Ion Sulfat (SO_4^{2-})

Penelitian ini menggunakan variasi jarak antara elektroda berupa Al/Al sebesar 1 cm, 1,25 cm, 1,5 cm, 1,75 cm dan 2 cm. Berikut hasil dari analisa pengaruh jarak terhadap efisiensi penyisihan ion sulfat pada limbah cair yang akan ditunjukkan pada gambar 4.4.

Berdasarkan gambar 4.4 menunjukkan ketika jarak antara elektroda diperkecil, maka nilai persentase penyisihan ion sulfat akan meningkat. Pada gambar 4.4(a), ketika jarak antara elektroda 2 cm, jika nilai tegangan dinaikkan, perbedaan nilai persentase penyisihan tidak terlalu berpengaruh. Pada saat jarak antara elektroda diperkecil mulai menunjukkan nilai persentase penyisihan meningkat ketika tegangan dinaikkan. Begitu juga ketika jarak

antara elektroda diperkecil, peningkatan nilai persentase penyisihan terlihat lebih signifikan terhadap peningkatan waktu proses. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.4(d) dimana grafik tersebut menunjukkan peningkatan nilai persentase penyisihan yang lebih besar dibandingkan lainnya.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan antara persen penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan jarak antara elektroda pada proses elektrokoagulasi

Adapun pengaruh jarak antara elektroda terhadap nilai persentase penyisihan yaitu semakin kecil jarak antara elektroda maka semakin meningkat nilai persentase penyisihan ion sulfat. Hal ini dikarenakan ketika jarak diperkecil, maka nilai hambatan yang dihasilkan semakin rendah sesuai dengan persamaan (2-30). Saat nilai hambatan pada larutan semakin rendah, maka kerapatan arus listrik yang dihasilkan akan semakin tinggi. Pernyataan ini sesuai pada tabel 4.1 dan juga persamaan hukum ohm (2-31) yang mengatakan jika hambatan elektrolit akan semakin kecil dan semakin tinggi pula kerapatan arus listrik yang mengalir pada elektroda (Putero dkk., 2008). Tabel 4.1 juga menjelaskan bahwa ketika kerapatan arus listrik semakin tinggi maka aliran hidrodinamik semakin turbulen di dalam sistem serta meningkatkan transfer massa logam aluminium ke dalam larutan. Semakin banyak ion aluminium di dalam larutan, maka koagulan semakin banyak serta laju reaksi antara koagulan dan polutan semakin meningkat, pernyataan ini sesuai dengan hipotesa dari penelitian oleh Hakizima pada tahun 2017. Dengan menggunakan jarak antara elektroda 1 cm dan tegangan 30V, menghasilkan kerapatan arus listrik dan endapan yang terbentuk juga paling besar. Adapun penggunaan daripada jarak yang semakin kecil dapat meningkatkan kerapatan arus yang dihasilkan sehingga meningkatkan

persentasi penyisihan kontaminan, sehingga kondisi ini mampu menurunkan biaya operasional untuk mencapai hasil yang maksimum.

Pada tabel 4.1 menunjukkan adanya pengurangan massa anoda yang dikarenakan pada anoda akan melepaskan ion-ion positif (ion Al^{3+}), akibat daripada ion-ion positif yang terlepas, maka akan menyebabkan pengikisan pada permukaan elektroda sehingga massa plat akan terus berkurang saat dialiri arus listrik. Dapat dilihat pada gambar 4.5(b), kondisi plat setelah elektrokoagulasi. Pada plat bagian anoda dimana kerapatan arus listrik yang mengalir melalui anoda sehingga terlihat adanya pengikisan elektroda dikarenakan pada anoda terjadi penguraian logam aluminium menjadi ionnya serta adanya disolusi anoda ke dalam larutan. Sesuai teori yang dikemukakan oleh Zaki Ahmad (2006) pada anoda juga terjadi *pitting corrosion* (korosi lubang) karena larutan yang digunakan mengandung ion sulfat, ion tersebut bersifat korosif. Pada katoda, adanya senyawa oksida yang melapisi di permukaan plat, menurut penelitian oleh Miguel dkk pada tahun 2017 masalah yang paling penting ketika menggunakan elektroda aluminium adalah terjadinya pasivasi ketika terbentuknya endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan Al_2O_3 yang melapisi elektroda karena tegangan sel yang diberikan nilainya cukup tinggi sehingga mengganggu kinerja dari elektrokoagulasi. Hal tersebut menjadikan tingginya energi yang dibutuhkan serta meningkatnya biaya perawatan. Beberapa cara untuk mencegah terjadinya pasivasi yaitu menggunakan kerapatan arus yang lebih rendah, kondisi aliran yang turbulen dan menggunakan jenis pasangan elektroda yang berbeda (Al/Grafit).



Gambar 4.5 Kondisi plat (a) sebelum proses dan (b) setelah proses elektrokoagulasi

Tabel 4.3 Penelitian penyisihan ion sulfat dengan metode elektrokoagulasi

No	Jenis Elektroda	Konsentrasi ion sulfat (ppm)	jarak elektroda (cm)	Kondisi operasi lainnya	% Penyisihan	Referensi
1	Al/Al	100	0,2	$I = 62 \text{ mA/cm}^2$, $t = 10 \text{ menit}$	72	Muruganathan dkk, 2004
2	Al/Al	887	0,2	$I = 13 \text{ mA/cm}^2$, $t = 90 \text{ menit}$	98	El-Naas dkk, 2009
3	Al/Al	550	1	$V = 30 \text{ Volt}$, $I^* = 9,3 \text{ mA/cm}^2$, $t = 80 \text{ menit}$	86,3	Penelitian ini

Keterangan : I^* : kerapatan arus listrik yang di hitung.

Tabel 4.3 menunjukkan penelitian penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) pada limbah cair dengan metode elektrokoagulasi dari beberapa referensi. Apabila penelitian ini dibandingkan dengan penelitian dari El-Naas dkk., (2009), persentase penyisihan ion sulfat lebih rendah dikarenakan adanya pengaruh jarak antara elektroda. Sedangkan jika dibandingkan dengan penelitian oleh Muruganathan dkk., (2004), persentase penyisihan ion sulfat lebih baik karena waktu proses elektrokoagulasi pada penelitian ini lebih panjang. Hal ini menunjukkan bahwa jarak antara elektroda juga menjadi salah satu aspek yang mempengaruhi nilai persentase penyisihan ion sulfat pada proses elektrokagulasi. Semakin kecil jarak antara elektroda maka nilai persentase penyisihan ion sulfat akan semakin meningkat.





BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian elektrokoagulasi pada limbah cair industri pertambangan batubara menggunakan elektroda aluminium dengan variasi tegangan dan variasi jarak menunjukkan bahwa :

1. Semakin tinggi tegangan pada proses elektrokoagulasi maka, nilai persentasi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) akan meningkat. Nilai persentasi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) tertinggi yaitu pada tegangan 30 V pada masing- masing jarak.
2. Jarak antar elektroda yang semakin menurun dari 2 cm hingga 1 cm meningkatkan nilai persentasi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) pada proses elektrokoagulasi, pada penelitian ini jarak antar elektroda yang menghasilkan nilai penyisihan maksimum yaitu sebesar 1 cm. Nilai persentasi penyisihan tertinggi yaitu pada tegangan 30 V dengan jarak 1 cm sebesar 86,3 %.

5.2. Saran

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

1. Perlu dilakukan analisis terhadap kandungan endapan yang terbentuk pada proses elektrokoagulasi penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}).
2. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut terhadap senyawa yang melapisi katoda.
3. Perlu dilakukan analisis pengaruh pengadukan terhadap terjadinya proses pasivasi pada saat elektrokoagulasi.
4. Perlu peninjauan lebih lanjut terhadap pengaruh faktor lain seperti pasangan elektroda yang digunakan, pH, suhu operasi dan sebagainya pada penyisihan ion sulfat (SO_4^{2-}) dengan metode elektrokoagulasi.



(Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Hesham, Walid K. Lafi, Khaleel Abushgair dan Jamal M. Assbeihat. 2016. *Comparison of Coagulation, Electrocoagulation and Biological Techniques for the Municipal Wastewater Treatment*. Amman: Research India Publications, 11014-11024
- Ahmad, Zaki. 2006 . *Priciples of Corrosion Engineerig and Corrosion Control*. London: Elsevier
- Arahman, Nasrul, Sri Mulyati dan Mirna Rahmah Lubis. 2017. *Romoval Profile of Sulfate Ion from Mix Ion Solution with Different Type and Configuration of Anion Exchange Membrane in Electrodialysis*. Banda Aceh: *Journal of Water Process Engineering* 20, 173-179
- Bowell, R. J.. 2004. *A Review of Sulfate Removal Options for Mine Waters*. Cardiff: *Proceedings International Mine Water Association Symposium*
- Brahmi, Khaled, Wided Bouguoerra, dan Bechir Hamrouni. 2015. *Investigation of Electrocoagulation Reactor Design Parameters Effects on the Removal of Cadmium from Synthetic and Phospate Industrial Wastewater*. *Arabian Journal of Chemistry*, 1878–5352.
- Butler, Erick, Yung Tse-Hung, Ruth Yu-Li Yeh dan Mohammed Suleiman Al-Ahmad. 2011. *Review Electrocoagulation in Wastewater Treatment*. Cleveland: *Water* (3), 495-525
- Cabrales, Nilson Marriage and Fiderman Machuca-Martinez. 2014. *Fundamentals of Electrocoagulation*. *Research Signpost*. 2: 1-14.
- Chen, Xueming, Guohua Chen, Po Lock Yue. 2000. *Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation*. Kowloon: Pergamon Chemical Engineering Science
- Dou, Weixiao, Zhen Zhou dan Lu-Mian Jang. 2017. *Sulfate Removal from Wastewater Using Ettringite Precipitation: Magnesium Ion Inhibition and Process Optimization*. Shanghai: *Journal of Environmental Management* 196, 518-526



- El-Naas, Muftah, Sulaiman Al-Zuhair, Amal Al-Lobaney, dan Souzan Makhlof. 2009. *Assessment of Electrocoagulation for the Treatment of Petroleum Refinery Wastewater*. Al-Ain: Elsevier
- Eyvaz, Murat, Ercan G, Serdar K dan Ebubekir Y. 2014. *Preventing of Cathode Passivation/Deposit in Electrochemical Treatment Methods – A Case Study on Winery Waste Water with Electrocoagulation*. Gebze: InTech
- Gawaad, R. S., S. K. Sharma dan S. S. Sambhi. 2011. *Comparative Study of Nano and RO Membrane for Sodium Sulphate Recovery from Industrial Waste Water*
- Hanum, Farida, Rondang Tambun, M. Yusuf Ritonga dan William Wardhana Kasim. 2015. *Aplikasi Elektrokoagulasi dalam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit*. Medan: Jurnal Teknik Kimia USU, Vol. 4, No. 4
- Hakim, Adhi Wibowo, Dadang Zainal Hasyim dan Toi Toha Afandi. 2009. *Penelitian Penanggulangan Air Asam Tambang pada Tambang Batubara Terbuka di Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan*. Bandung: Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara
- Hakizimana, Bouchaib Gourich, Mochammed Chafi, Youssef Stiriba dan Christophe Vial 2017. *Electrocoagulation Process in Water Treatment: A Review of Electrocoagulation Modeling Approaches*. France: Elsevier
- Harris, Daniel C. 2007. *Quantitative Chemical Analysis Seventh Edition*. New York: W. H. Freeman and Company
- Holt, Peter K dan Geoffrey. 2012. *A Quantitative Comparison between Chemical Dosing and Electrocoagulation*. Colloids and Surfaces A: Physiochem. Eg. Aspects 211, 233–248.
- Jacobs, James A, Jacques Guertin, dan Cynthia P. Avakian. 2016. *Chromium (VI) Handbook*. Florida : CRC Press.
- Kim, Tak-Hyun, C Park, Eung-Bai S dan Sangyong K. 2002. *Decolorization of Disperse and Reactive Dyes by Continuous Electrocoagulation Process*. Ansan: Elsevier
- Kumar, Arum Sharma dan Chopra A.K. 2017. *Removal of Nitrat and Sulphate form Biologically Treated Municipal Wastewater by Electrocoagulation*. Haridwar: Springer.

- Mamelkina, Maria A., Salvador Cottilas dan Engracia Lacasa. 2017. *Removal of Sulfate from Mining Waters by Electrocoagulation*. Albacete: *Separation and Purification Technology* 182, 87-93
- Metcalf, Edy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th Edition*. Hongkong: Mc Graw Hill
- Miguel, Sandoval, Jose, Nova, Oscar, Gilberto, dan Luz A. Ariaz. 2016. *Sulfate ions removal from an aqueous solution modeled on an abandoned mine by electrocoagulation process with recirculation*. Mexico ; *International Journal of Electrochemical Science*.
- Mirzae Nizam, Hoosyar, Poursan, Seyed, Hamid, dan Allahbaksh. 2015. *Optimization of the electrocoagulation process for sulfate removal using response surface methodology*. Iran; *Bulgarian Chemical Communications Volume* 47
- Mollah, M. Yusuf A., Robert Schennach, Jose R. Parga. David L. Cocke. 2001. *Electrocoagulation (EC) – Science and Application*. Beaumont: *Journal of Hazardous Material* B84, 29-41
- Moreno, H. A. C., D. L. Cocke dan J. A. G. Gomes. 2007. *Electrochemistry Behind Electrocoagulation Using Iron Electrodes*. Saltillo : *ECS Transactions*, 6 (9), 1-15
- Murugunathan. M., G. Bhaskar Raju dan S. Prabhakar. 2004. *Removal of Sulfide, Sulfate, and Sulfite Ion by Electrocoagulation*. Chennai: *Journal of Hazardous Material* B109, 37-44
- Najib, Tahereh, Mostafa Solgi dan Abbas Farazman. 2017. *Optimization of Sulfate Removal by Sulfate Reducing Bacteria Using Response Methodology and Heavy Metal Removal in a Sulfidogenic UASB Reactor*. Tehran: *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Nariyan, Elham, Mika S, Christian W. 2017. *Electrocoagulation Treatment of Mine Water From the Deepest Working European Metal Mine – Performance, Isotherm and Kinetic Studies*. Mikkeli: Elsevier.
- Panigrahi, M.K., P. K. Sahoo, S. Tripathy, Sk. Md. Equeendin. 2010. *Hydrogeochemical Characteristics of Acid Mine Drainage and Water Pollution at Makum Coalfield, India*. Orissa: Elsevier

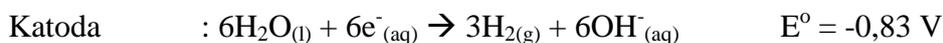
- Pizzi, Nicholas G., 2011, *Water Treatment Operator Handbook*, USA: American Water Works Association
- Pulkka, Susanna, Mika Martikainen, Amit Bhatnagar dan Mika Sillanpaa. 2014. *Electrochemical Methods for the Removal of Anionic Contaminants from Water – A Review*. Espoo: *Separation and Purification Technology* 132, 252-271
- Putero, S.H., Kusnanto dan Yusriani. 2008. *Pengaruh Tegangan dan Waktu pada Pengolahan Limbah Radioaktif yang Mengandung Sr-90 Menggunakan Metode Elektrokoagulasi*. Makalah disajikan pada Prosiding Seminar Nasional ke-14 Teknologi dan Keselematan PLTN serta Fasilitas Nuklir Bandung 5 November.
- Sawyer, Perry L., Gene F. Parkin. 2003. *Chemistry for Enviromental Engineering and Science*. New York : Mc-Graw Hill
- SNI 06-6989.20-2004.2004 Air dan Air Limbah-20.2 Cara Uji Sulfat, SO_4^{2-} secara Turbidimetri. Jakarta. Badan Standarisasi Nasional
- Sunarya, Ali, Elfridawati. 2013. *Penggunaan Metode Elektrokoagulasi pada Pengolahan Limbah Industri Penyamakan Kulit Menggunakan Alumminium sebagai Sacrificial Elektrode*. Yogyakarta: UPI Press
- Tchobanoglous, George, Franklin L. Burton, H. David Stensel. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse 4th Edition*. Michigan: Metcalf & Eddy Inc. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Trimurti, Aldo Zahviera dan Abyan Ilham. 2017. *Pengaruh Variasi Konfigurasi Elektroda dan Tegangan dalam Menyisihkan Kromium (VI) dari Limbah Cair Industri Elektroplating dengan Proses Elektrokoagulasi*. Malang: Universitas Brawijaya
- Vermani, O. P. dan A. K. Narula, 1995, *Applied Chemistry Theory and Practice*, Mumbai: New Age International Publishers
- Walker, William J, Jorge Montoy dan Tyler Chatriand. 2015. *Sulfate Removal from Coal Mine Water in Western Pennsylvania: Regulatory Requirements, Design, and Performance*. JASMR Volume 4, Issue 1





LAMPIRAN A

DATA PERHITUNGAN

A.1. Perhitungan E^o sel Elektrolisis

$$E^o \text{ sel} = E^o \text{ katoda} - E^o \text{ Anoda}$$

$$E^o \text{ sel} = -0,83 \text{ V} - (+ 1,66\text{V}) = - 2,49 \text{ V (reaksi tidak spontan)}$$

A.2. Larutan Induk Sulfat

Larutan baku kurva kalibrasi ion sulfat dibuat dengan melarutkan 1,479 gram Na₂SO₄ dalam akuades hingga 1000 ml.

$$\text{BM Na}_2\text{SO}_4 = 142,04 \text{ g/mol}$$

$$\text{BM SO}_4^{2-} = 96,06 \text{ g/mol}$$

$$\text{V larutan} = 1000 \text{ ml}$$



$$\frac{\text{BM Natrium Sulfat}}{\text{BM Ion Sulfat}} \times = \text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4$$

$$\frac{142,04 \text{ g/mol}}{96,06 \text{ g/mol}} \times 1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4 = 1478,66 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\text{Massa Natrium Sulfat}}{\text{Volume Larutan}}$$

$$1478,66 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{\text{Massa}}{1 \text{ L}}$$

$$\text{Massa Na}_2\text{SO}_4 = 1479 \text{ mg}$$

$$= 1,479 \text{ gram}$$

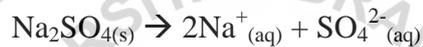
A.3. Larutan Baku kurva kalibrasi

larutan kurva kalibrasi dihasilkan dari pengenceran larutan induk dengan konsentrasi 1000 ppm menggunakan akuades hingga didapatkan konsentrasi larutan sebesar 100 ppm.

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 142,04 \text{ g/mol}$$

$$\text{BM SO}_4^{2-} = 96,06 \text{ g/mol}$$

$$V \text{ larutan} = 1000 \text{ ml}$$



$$\frac{\text{BM Natrium Sulfat}}{\text{BM Ion Sulfat}} \times = \text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4$$

$$\frac{142,04 \text{ g/mol}}{96,06 \text{ g/mol}} \times 100 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4$$

$$\text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4 = 147,866 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_4 = \frac{\text{Massa Natrium Sulfat}}{\text{Volume Larutan}}$$

$$147,866 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{\text{Massa}}{1 \text{ L}}$$

$$\text{Massa Na}_2\text{SO}_4 = 147,9 \text{ mg}$$

$$= 0,1479 \text{ gram}$$

A.4. larutan Kurva Kalibrasi

Larutan kurva kalibrasi dihasilkan dari pengenceran larutan baku kurva kalibrasi dengan konsentrasi 100 ppm menggunakan akuades hingga didapatkan konsentrasi larutan sebesar 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm, 5 ppm, 6 ppm.

$$\text{Konsentrasi larutan baku kurva kalibrasi} = 100 \text{ ppm}$$

$$V \text{ larutan baku kurva kalibrasi} = 100 \text{ ml}$$

volume larutan baku yang harus diambil untuk mendapatkan larutan kurva kalibrasi dengan konsentrasi 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm, 5 ppm, 6 ppm adalah

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

M_1 = Konsentrasi larutan induk sulfat

M_2 = Volume larutan induk Sulfat

M_2 = Konsentrasi larutan baku kurva kalibrasi

V_2 = Volume larutan baku kurva kalibrasi

Larutan baku kurva kalibrasi = 1 ppm

$$100 \text{ ppm} \times V_1 = 1 \text{ ppm} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 = 1 \text{ ml}$$

Larutan baku kurva kalibrasi = 2 ppm

$$100 \text{ ppm} \times V_1 = 2 \text{ ppm} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 = 2 \text{ ml}$$

Larutan baku kurva kalibrasi = 3 ppm

$$100 \text{ ppm} \times V_1 = 3 \text{ ppm} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 = 3 \text{ ml}$$

Larutan baku kurva kalibrasi = 4 ppm

$$100 \text{ ppm} \times V_1 = 4 \text{ ppm} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 = 4 \text{ ml}$$

Larutan baku kurva kalibrasi = 5 ppm

$$100 \text{ ppm} \times V_1 = 5 \text{ ppm} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

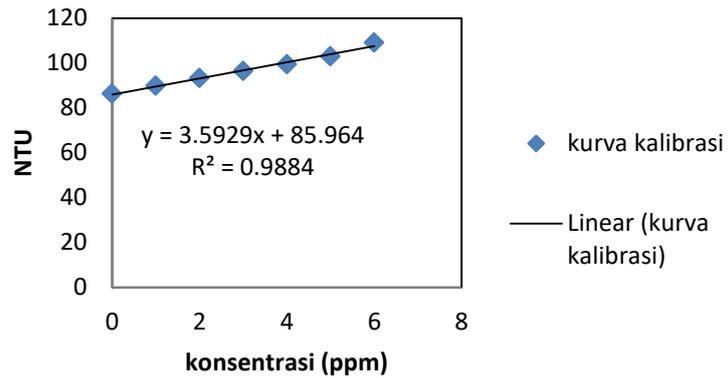
Larutan baku kurva kalibrasi = 6 ppm

$$100 \text{ ppm} \times V_1 = 6 \text{ ppm} \times 100 \text{ ml}$$

$$V_1 = 6 \text{ ml}$$

Tabel A.1. Kurva kalibrasi

Kurva Kalibrasi		
No	konsentrasi (ppm)	NTU
1	0	86,3
2	1	89,8
3	2	93,3
4	3	96,4
5	4	99,4
6	5	103
7	6	109



Gambar A.1. Grafik kurva kalibrasi ion sulfat

Hasil dari kalibrasi ion sulfat dapat dilihat pada tabel 1. Persamaan kurva kalibrasi ion sulfat dapat dilihat pada gambar 1 yaitu : $y = 3,5929x + 85,964$

Keterangan : x = konsentrasi ion sulfat dalam larutan sintesis

y = Nilai Nephelometri Turbidity Unit (NTU)

A.5. Pembuatan Larutan Uji

Larutan uji dengan konsentrasi 550 ppm dibuat dengan cara mengencerkan larutan induk sulfat sebesar 550 ml hingga 1000 ml.

Diketahui : Konsentrasi larutan induk ion sulfat = 1000 ppm

V larutan baku kurva kalibrasi = 1000 ml

Ditanya : Berapa volume larutan induk ion sulfat yang harus diambil untuk mendapatkan larutan uji sebesar 550 ppm ?

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

Larutan induk ion sulfat = 1000 ppm

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 550 \text{ ppm} \times 1000 \text{ ml}$$

$$V_1 = 550 \text{ ml}$$

A.6. Konsentrasi Ion Sulfat

Konsentrasi ion sulfat sebesar 550 ppm selanjutnya diukur dengan turbidimetri untuk mendapatkan nilai NTU. Selanjutnya menggunakan persamaan dari kurva kalibrasi untuk mendapatkan konsentrasi sampel yang sesungguhnya. Ketika larutan ion sulfat dengan konsentrasi 550 ppm, didapatkan nilai NTU sebesar 106, sehingga :

$$Y = 106 \text{ NTU}$$

$$\text{Faktor pengenceran} = 100$$

Dengan persamaan $y = 3,5929x + 85,964$, maka :

$$106 = 3,5929x + 85,964$$

$$x \text{ (konsentrasi)} = \frac{106 - 85,964}{3,5929}$$

$$x \text{ (konsentrasi)} = 5,57 \times \text{faktor pengenceran}$$

$$= 5,57 \times 100$$

$$= 557 \text{ ppm}$$

A.7. Data Analisa Perhitungan Penyisihan Ion Sulfat dengan Teknik Elektrokoagulasi

Contoh perhitungan persentase penyisihan (%penyisihan) ion sulfat pada tegangan 15 V dan jarak elektroda 2 cm pada waktu 10 menit menggunakan elektroda Al/Al

$$\% \text{Penyisihan ion sulfat} = \frac{\text{Konsentrasi awal ion sulfat} - \text{konsentrasi ion sulfat akhir}}{\text{konsentrasi awal ion sulfat}} \times 100\%$$

$$= \frac{557,7 - 502}{557,7} \times 100\%$$

$$= 10\%$$

Tabel A.2. Hasil perhitungan %penyisihan ion sulfat dengan tegangan sebesar 15 V

No	jarak antara elektroda (cm)	t (menit)	konsentrasi (ppm)	%Penyisihan
1	2	0	557,7	0
		10	502,0	10,0
		20	474,2	15,0
		30	446,3	20,0
		40	390,7	29,9
		50	376,7	32,4
		60	323,9	41,9
		70	312,7	43,9
		80	307,2	44,9
2	1,75	0	557,7	0
		10	557,7	0,0
		20	502,0	10,0
		30	502,0	10,0
		40	390,7	29,9
		50	374,0	32,9
		60	354,5	36,4
		70	321,1	42,4
		80	301,6	45,9
3	1,5	0	557,7	0,0
		10	529,8	5,0
		20	502,0	10,0
		30	474,2	15,0
		40	365,6	34,4
		50	346,1	37,9
		60	315,5	43,4
		70	293,2	47,4
		80	287,7	48,4
4	1,25	0	557,7	0,0
		10	557,7	0,0
		20	502,0	10,0
		30	390,7	29,9
		40	365,6	34,4
		50	332,2	40,4
		60	301,6	45,9
		70	284,9	48,9
		80	279,3	49,9
5	1	0	557,7	0,0
		10	474,2	0,0
		20	474,2	10,0
		30	385,1	29,9
		40	354,5	34,4
		50	315,5	40,4
		60	271,0	45,9
		70	268,2	48,9
		80	259,8	49,9

Tabel A.3. Hasil perhitungan %penyisihan ion sulfat dengan tegangan sebesar 20 V

No	jarak antara elektroda (cm)	t (menit)	konsentrasi (ppm)	%Penyisihan
1	2	0	557,7	0,0
		10	502,0	10,0
		20	418,5	25,0
		30	382,3	31,4
		40	351,7	36,9
		50	337,8	39,4
		60	326,6	41,4
		70	312,7	43,9
		80	298,8	46,4
2	1,75	0	557,7	0,0
		10	557,7	0,0
		20	502,0	10,0
		30	446,3	20,0
		40	382,3	31,4
		50	340,6	38,9
		60	298,8	46,4
		70	276,5	50,4
		80	245,9	55,9
3	1,5	0	557,7	0,0
		10	502,0	10,0
		20	474,2	15,0
		30	446,3	20,0
		40	360,0	35,4
		50	323,9	41,9
		60	273,8	50,9
		70	240,4	56,9
		80	237,6	57,4
4	1,25	0	557,7	0,0
		10	557,7	0,0
		20	446,3	20,0
		30	390,7	29,9
		40	307,2	44,9
		50	273,8	50,9
		60	218,1	60,9
		70	187,5	66,4
		80	181,9	67,4
5	1	0	557,7	0,0
		10	474,2	15,0
		20	390,7	29,9
		30	337,8	39,4
		40	290,5	47,9
		50	240,4	56,9
		60	176,3	68,4
		70	154,1	72,4
		80	148,5	73,4

Tabel A.4. Hasil perhitungan %penyisihan ion sulfat dengan tegangan sebesar 25 V

No	jarak antara elektroda (cm)	t (menit)	konsentrasi (ppm)	%Penyisihan
1	2	0	557,7	0,0
		10	557,7	0,0
		20	390,7	29,9
		30	376,7	32,4
		40	351,7	36,9
		50	335,0	39,9
		60	329,4	40,9
		70	307,2	44,9
		80	282,1	49,4
2	1,75	0	557,7	0
		10	502,0	10,0
		20	446,3	20,0
		30	390,7	29,9
		40	362,8	34,9
		50	329,4	40,9
		60	290,5	47,9
		70	259,8	53,4
		80	232,0	58,4
3	1,5	0	557,7	0,0
		10	502,0	10,0
		20	446,3	20,0
		30	390,7	29,9
		40	354,5	36,4
		50	315,5	43,4
		60	257,1	53,9
		70	215,3	61,4
		80	209,7	62,4
4	1,25	0	557,7	0,0
		10	474,2	15,0
		20	446,3	20,0
		30	390,7	29,9
		40	293,2	47,4
		50	243,1	56,4
		60	184,7	66,9
		70	176,3	68,4
		80	168,0	69,9
5	1	0	557,7	0,0
		10	474,2	15,0
		20	382,3	31,4
		30	329,4	40,9
		40	251,5	54,9
		50	220,9	60,4
		60	162,4	70,9
		70	109,5	80,4
		80	104,0	81,4

Tabel A.5 Hasil perhitungan %penyisihan ion sulfat dengan tegangan sebesar 30 V

No	jarak antara elektroda (cm)	t (menit)	konsentrasi (ppm)	%Penyisihan
1	2	0	557,7	0,0
		10	529,8	5,0
		20	474,2	15,0
		30	385,1	30,9
		40	301,6	45,9
		50	290,5	47,9
		60	279,3	49,9
		70	268,2	51,9
		80	259,8	53,4
2	1,75	0	557,7	0
		10	529,8	5,0
		20	446,3	20,0
		30	382,3	31,4
		40	348,9	37,4
		50	321,1	42,4
		60	284,9	48,9
		70	251,5	54,9
		80	209,7	62,4
3	1,5	0	557,7	0,0
		10	502,0	10,0
		20	418,5	25,0
		30	371,2	33,4
		40	329,4	40,9
		50	259,8	53,4
		60	204,2	63,4
		70	190,3	65,9
		80	184,7	66,9
4	1,25	0	557,7	0,0
		10	418,5	25,0
		20	340,6	38,9
		30	340,6	38,9
		40	279,3	49,9
		50	237,6	57,4
		60	176,3	68,4
		70	154,1	72,4
		80	131,8	76,4
5	1	0	557,7	0,0
		10	474,2	15,0
		20	390,7	29,9
		30	318,3	42,9
		40	243,1	56,4
		50	187,5	66,4
		60	140,2	74,9
		70	81,7	85,3
		80	76,2	86,3

A.8. Data Hasil Penelitian Pengurangan Massa Anoda Al

Tabel A.6. data massa anoda yang hilang selama proses elektrokoagulasi.

No	Jarak (cm)	Tegangan (V)	Massa Anoda Al (g)		Δ massa anoda Al (gr)
			Sebelum	sesudah	
1	1	15	8,57	8,56	0,01
2		20	8,56	8,55	0,01
3		25	8,49	8,46	0,03
4		30	8,46	8,36	0,1
5	1,25	15	8,61	8,6	0,01
6		20	8,67	8,66	0,01
7		25	8,85	8,78	0,07
8		30	8,81	8,72	0,09
9	1,5	15	8,41	8,39	0,02
10		20	8,78	8,76	0,02
11		25	8,48	8,44	0,04
12		30	8,57	8,51	0,06
13	1,75	15	8,7	8,68	0,02
14		20	8,59	8,54	0,05
15		25	8,61	8,56	0,05
16		30	8,54	8,49	0,05
17	2	15	8,41	8,39	0,02
18		20	8,71	8,68	0,03
19		25	8,55	8,52	0,03
20		30	8,56	8,51	0,05

A.9. Data Hasil Penelitian Endapan yang Terbentuk

Tabel A.7. data massa anoda yang hilang selama proses elektrokoagulasi.

No	Jarak (cm)	Tegangan (V)	Massa Endapan (gr)
1	1	15	0,11
2		20	0,11
3		25	0,25
4		30	0,49
5	1,25	15	0,1
6		20	0,1
7		25	0,23
8		30	0,35
9	1,5	15	0,11
10		20	0,24
11		25	0,25
12		30	0,32
13	1,75	15	0,1
14		20	0,23
15		25	0,25
16		30	0,3
17	2	15	0,1
18		20	0,14
19		25	0,17
20		30	0,28

A.10. Perhitungan Laju Gas yang Terbentuk Selama Proses Elektrokoagulasi

Gelembung gas yang terbentuk, dapat dihitung dengan persamaan dari penerapan hukum faraday (Chen dan Christos, 2010) :

$$Q_g = Q_H + Q_O = \frac{IVo}{F} \left(\frac{1}{n_H} + \frac{1}{n_O} \right) = 1,74 \times 10^{-4} I$$

Dimana, Q_g adalah total laju gas yang terbentuk (L/s) pada kondisi STP, Q_H adalah laju gas hidrogen yang terbentuk (L/s), Q_O adalah laju gas oksigen yang terbentuk (L/s), I adalah arus listrik yang diberikan, V_o molar volume dari gas pada kondisi STP (22,4 L/mol), F adalah konstanta faraday (96.500 C/mol elektron), n_H bilangan elektron dari H_2 (2 mol elektron per mol H_2) dan n_O adalah bilangan elektron untuk O_2 (4 mol elektron per mol). Adapun contoh perhitungan adalah sebagai berikut :

Arus listrik mula-mula (I) = 0,38 A

Maka total laju gas yang terbentuk yaitu :

$$Q_g = 1,74 \times 10^{-4} I$$

$$Q_g = 1,74 \times 10^{-4} \times (0,38 \text{ A})$$

$$Q_g = 0,6612 \times 10^{-4} \text{ L/s}$$

$$Q_g = 0,066 \text{ mL/s}$$

Tabel A.8. data jumlah gas gelembung yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi.

No	Jarak (cm)	Tegangan (V)	Kerapatan Arus listrik (mA/cm ²)	Jumlah gas gelembung yang terbentuk (mL/s)
1	1	15	4.9	0,035
2		20	5.1	0,037
3		25	5.6	0,040
4		30	9.3	0,066
5	1,25	15	4.9	0,035
6		20	5.1	0,037
7		25	5.4	0,038
8		30	7.1	0,050
9	1,5	15	3.7	0,026
10		20	4.4	0,031
11		25	4.9	0,035
12		30	6.3	0,045
13	1,75	15	3.4	0,024
14		20	4.4	0,031
15		25	4.9	0,035
16		30	6.1	0,044
17	2	15	2.4	0,017
18		20	4.4	0,031
19		25	4.9	0,035
20		30	5.4	0,038

A.11. Perhitungan Massa Alumunium yang Larut Secara Teoritis

$$m = \frac{M \times I \times t}{F \times n}$$

m = massa aluminium yang larut (gr)

M = Massa Molar Al (27 gr/mol)

I = kuat Arus (0,38 A)

t = waktu elektrokoagulasi (480 detik)

F = ketetapan faraday (96485 C/mol)

n = jumlah elektron dalam reaksi (untuk Al^{3+} adalah 3)

$$m = \frac{27 \left(\frac{gr}{mol} \right) \times 0.38 A \times 480 s}{96483 \left(\frac{C}{mol} \right) \times 3 A/C}$$

m = 0,170 gr

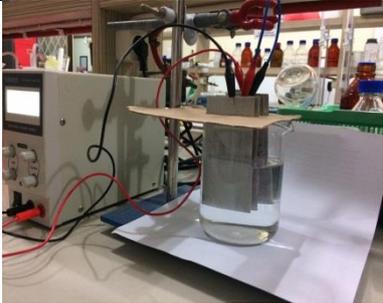
Tabel A.9. data jumlah alumunium yang larut secara teoritis selama proses elektrokoagulasi.

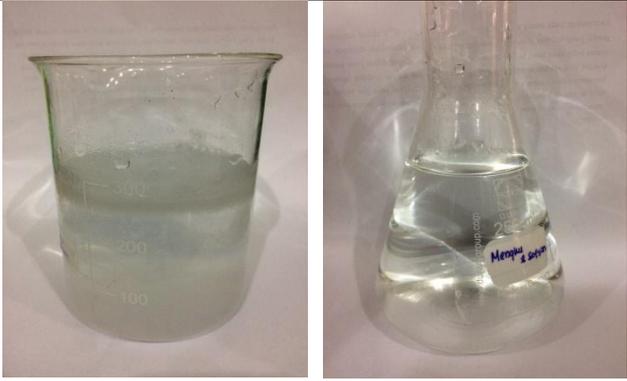
Arus (A)	mass eks (gr)	mass teo (gr)	efesieni arus (%)
0.2	0.01	0.090	11.2
0.21	0.01	0.094	10.6
0.23	0.03	0.103	29.1
0.38	0.1	0.170	58.8
0.2	0.01	0.090	11.2
0.21	0.01	0.094	10.6
0.22	0.07	0.099	71.1
0.29	0.09	0.130	69.3
0.15	0.02	0.067	29.8
0.18	0.02	0.081	24.8
0.2	0.04	0.090	44.7
0.26	0.06	0.116	51.5
0.14	0.02	0.063	31.9
0.18	0.05	0.081	62.0
0.2	0.05	0.090	55.8
0.25	0.05	0.112	44.7
0.1	0.02	0.045	44.7
0.18	0.03	0.081	37.2
0.2	0.03	0.090	33.5
0.22	0.05	0.099	50.8

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



LAMPIRAN B
DOKUMENTASI

No	Dokumentasi	Keterangan
1.		<p>Proses elektrokoagulasi dengan konfigurasi mono-polar seri</p>
2.		<p>Pelat elektroda sebelum proses elektrokoagulasi</p>
3.		<p>Pelat elektroda sesudah proses elektrokoagulasi</p>
4.		<p>Larutan ion sulfat (SO_4^{2-}) sebelum proses elektrokoagulasi</p>

5.	 <p style="text-align: center;">(a) (b)</p>	<p>Larutan ion sulfat (SO_4^{2-}):</p> <p>a) setelah proses elektrokoagulasi b) Setelah penyaringan</p>
6.		<p>Endapan kering yang terbentuk setelah proses elektrokoagulasi</p>
7.		<p>Alat turbidimeter untuk mengukur nilai NTU.</p>
8.		<p>Pembentukan gas gelembung pada saat proses elektrokoagulasi yang membantu proses penyisihan.</p>

RIWAYAT HIDUP

Hamengku Samudro Parangkirana, Cirebon 15 Mei 1997, anak dari Ifan Santoso dan Ika Agustia Purwohanida, lulus dari SDN Kagok 02 Kabupaten Tegal, SMP Negeri 1 Adiwerna, SMA Negeri 1 Slawi, lulus program sarjana Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Tahun 2018. Praktek Kerja Lapang di PT. Pertamina RU VI, Balongan Jawa Barat tahun 2017.

Malang, 3 September 2018

Penulis



RIWAYAT HIDUP

Sofyan Abdullah Nasution, Medan 11 Mei 1996, anak dari Syahril Nasution dan Elly Yunita, lulus dari SD Pertiwi Medan, SMP Negeri 11 Medan, SMA Negeri 1 Medan, lulus program sarjana Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Tahun 2018. Praktek Kerja Lapang di PT. Pertamina RU VI, Balongan Jawa Barat tahun 2017.

Malang, 3 September 2018

Penulis

