

Optimasi Penurunan Kadar Ion Logam Timbal (Pb) Pada Simulasi Limbah Cair *Electroplating* Melalui Proses Elektrokoagulasi Dengan Metode *Central Composite Design* (CCD)

R. LUSI APRIYANI^{1*}, VINA AMALIA¹ DAN YUSUF ROHMATULLOH¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati
Bandung, Jalan A.H Nasution No. 105, Cipadung, Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat
40614, Indonesia

*alamat email korespondensi: aprianilusi504@gmail.com

Informasi Artikel	Abstrak/Abstract
Kata Kunci: : <i>central composite design</i> (CCD); <i>electroplating</i> ; elektrokoagulasi; ion logam berat; timbal.	Pencemaran ion logam berat di badan air masih menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang serius di Indonesia. Hasil studi Ecoton menunjukkan bahwa sungai-sungai di Indonesia telah terkontaminasi berbagai ion logam berat yang berasal dari aktivitas antropogenik, termasuk kegiatan industri. Salah satu industri yang berpotensi menghasilkan limbah cair mengandung ion logam berat adalah industri <i>electroplating</i> . Industri ini menghasilkan limbah cair yang mengandung ion logam berat, salah satunya timbal (Pb), yang bersifat beracun sehingga dapat mencemari lingkungan perairan jika tidak diolah dengan baik. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi penurunan kadar ion Pb dalam limbah buatan yang mensimulasikan limbah cair <i>electroplating</i> menggunakan metode elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium (Al) sebagai anoda dan elektroda timbal (Pb) sebagai katoda. Optimasi dilakukan menggunakan Response Surface Methodology (RSM) dengan desain Central Composite Design (CCD) melalui variasi pH (5, 7, dan 9), jarak elektroda (1, 2, dan 3 cm), tegangan (6, 9, dan 12 V), serta waktu elektrokoagulasi (30, 45, dan 60 menit). Berdasarkan hasil optimasi kondisi operasi optimum diperoleh pada pH 9, jarak elektroda 3 cm, tegangan 12 V, dan waktu elektrokoagulasi 48 menit, dengan hasil validasi eksperimen pada kondisi optimum sebesar 99,9061%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode elektrokoagulasi mampu menurunkan kadar Pb secara efektif, dengan pH dan waktu elektrokoagulasi sebagai faktor yang berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penuran kadar ion logam timbal (Pb ²⁺).
Keywords: Antioxidants; herbs; kombucha; organoleptic properties; fermentation.	<i>Heavy metal contamination in water bodies remains one of the most serious environmental problems in Indonesia. An Ecoton study reported that rivers in Indonesia have been contaminated by various heavy metals originating from anthropogenic activities, including industrial activities. One of the industries that potentially generates heavy metal-containing wastewater is the electroplating industry. Electroplating wastewater contains heavy metals, particularly lead (Pb), which is toxic and may contaminate aquatic environments if discharged without adequate treatment. This study aimed to optimize the removal of Pb ions from synthetic wastewater simulating electroplating effluent using the electrocoagulation process with an aluminum (Al) electrode as the anode and a lead (Pb) electrode as the cathode. The optimization was carried out using Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD) by varying the pH (5, 7, and 9), electrode distance (1, 2, and 3 cm), applied voltage (6, 9, and 12 V), and electrocoagulation time (30, 45, and 60 min). The optimization results indicated that the optimum operating conditions were obtained at pH 9,</i>

an electrode distance of 3 cm, an applied voltage of 12 V, and an electrocoagulation time of 48 min. Experimental validation under the optimum conditions achieved a Pb removal efficiency of 99.9061%. These findings demonstrate that the electrocoagulation process is highly effective for Pb removal, with pH, electrode distance, applied voltage, and electrocoagulation time identified as significant factors affecting the removal efficiency.

PENDAHULUAN

Pencemaran ion logam berat di perairan masih menjadi permasalahan lingkungan yang serius di Indonesia. Berdasarkan hasil studi *Ecological Observation and Wetland Conservation* (Ecoton) yang diberitakan oleh Kompas, sungai-sungai di Indonesia telah terkontaminasi berbagai ion logam berat, seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan seng (Zn) [1]. Salah satu sumber pencemaran ion logam berat berasal dari aktivitas industri. Industri *electroplating* merupakan salah satu kegiatan industri yang menghasilkan limbah cair yang berpotensi mengandung berbagai ion logam berat, termasuk ion logam timbal (Pb^{2+}) [2]. Limbah cair tersebut perlu diolah sebelum dibuang ke lingkungan untuk mengurangi risiko pencemaran perairan.

Salah satu metode yang umum diusulkan untuk pengelolaan limbah cair adalah metode elektrokoagulasi (EK). Elektrokoagulasi merupakan proses pengolahan yang memanfaatkan arus listrik untuk menghasilkan koagulan dari elektroda sehingga kontaminan dapat mengalami destabilisasi, koagulasi, dan pemisahan dari larutan [3]. Pada proses menggunakan elektroda aluminium, ion aluminium yang terbentuk selama elektrolisis dapat menghasilkan spesies hidroksida yang berperan dalam proses koagulasi [3].

Efektivitas elektrokoagulasi dipengaruhi oleh berbagai kondisi operasi, antara lain pH, jarak elektroda, tegangan, dan waktu proses. pH awal larutan berhubungan dalam menentukan kelarutan dan bentuk kimia jenis ion logam berat serta koagulan logam yang terbentuk [4]. Jarak elektroda berhubungan dengan resistansi larutan dan distribusi medan listrik dalam sistem elektrokoagulasi. Jarak yang terlalu besar dapat meningkatkan resistansi, sedangkan jarak yang terlalu kecil dapat meningkatkan risiko terjadinya gangguan pada proses [5]. Tegangan yang memiliki peran penting dalam menentukan laju pelepasan ion logam dari anoda dan jumlah koagulan yang dihasilkan [5].

Terakhir waktu elektrolisis, yang menentukan waktu interaksi antara polutan dan koagulan yang dihasilkan, sehingga memengaruhi efisiensi proses [4] [6].

Untuk memperoleh kombinasi kondisi operasi yang optimum, *Response Surface Methodology* (RSM) dapat digunakan. RSM merupakan pendekatan matematika dan statistik untuk memodelkan hubungan antara beberapa variabel bebas dengan respons serta menentukan kondisi optimum suatu proses [7]. Salah satu rancangan eksperimen yang dapat digunakan dalam RSM adalah *Central Composite Design* (CCD).

Pada penelitian ini dilakukan optimasi proses elektrokoagulasi terhadap simulasi limbah cair *electroplating* yang mengandung ion Pb^{2+} menggunakan elektroda Al-Pb. Variabel yang dikaji meliputi pH, jarak elektroda, tegangan, dan waktu elektrokoagulasi. Penentuan kondisi optimum dilakukan menggunakan RSM dengan rancangan CCD, sedangkan kadar Pb^{2+} dianalisis menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). Tujuan penelitian ini adalah menentukan pengaruh variabel proses terhadap efisiensi penurunan Pb^{2+} serta memperoleh kondisi operasi optimum berdasarkan pemodelan CCD

EKSPERIMEN

Material

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah $Pb(NO_3)_2$ p.a Merck, NaOH p.a Merck, NaCl p.a Merck, HCl p.a Emsure, HNO_3 p.a Supelco, Akuades, dan Aqua DM.

Instrumentasi

Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) Agilent Technologies 200 Series AA 240FS-AA

Prosedur

Desain Eksperimen

Desain eksperimen dilakukan menggunakan RSM dengan rancangan CCD. Empat variabel bebas digunakan, yaitu pH, jarak elektroda, tegangan, dan waktu elektrokoagulasi, seperti yang ditunjukkan **Tabel I**. Berdasarkan keempat variabel tersebut, CCD menghasilkan total 31 percobaan.

Tabel I. Variabel masukan dari metode permukaan responss dengan *Central Composite Design* (CCD) untuk proses elektrokoagulasi

Variabel	-1	0	1
pH	5	7	9
Jarak Elektroda (cm)	1	2	3
Tegangan (V)	6	9	12
Waktu (Menit)	30	45	60

Preparasi dan Pembuatan Elektroda

Elektroda aluminium dan elektroda timbal lempengan dibuat dengan ukuran 4×5 cm dan dengan ketebalan 1 mm. Setelah itu dibersihkan dengan menggunakan larutan HCl 1 M yang diambil dari HCl pekat sebanyak 8,36 mL dan diencerkan dengan akuades pada labu 100 mL. Kemudian dibilas dengan akuades.

Pembuatan Kurva Kalibrasi

Larutan deret standar timbal (Pb) dengan konsentrasi 1, 5, 10, 15 dan 20 ppm disiapkan dalam botol vial 100 mL dan kemudian dianalisis menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) pada panjang gelombang 283,3 nm [8]. Kurva kalibrasi larutan deret standar timbal (Pb) digunakan untuk menentukan konsentrasi logam timbal (Pb) dalam sampel. Untuk menghitung konsentrasi sampel, dapat menggunakan persamaan linear dari kurva kalibrasi larutan deret standar timbal (Pb), yang dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$y = mx + c \quad (1)$$

Pembuatan Limbah Buatan Pb 1500 ppm

Pembuatan limbah buatan Pb 1500 ppm dengan cara serbuk $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ditimbang sebanyak

2,3978 g, larutkan sedikit dengan aqua dm di gelas kimia. Kemudian diaduk hingga homogen dan dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL. Lalu ditanda bataskan dengan aqua dm dan homogenkan.

Proses Elektrokoagulasi Dengan Variasi pH, Jarak Elektroda, Tegangan, dan Waktu

Sebanyak 200 mL sampel limbah buatan Pb dan 2 g NaCl, ditambahkan beberapa tetes HCl 1M atau NaOH 1M hingga pH sesuai dengan *Central Composite Design* (CCD). Masukkan ke dalam gelas kimia, kemudian elektroda aluminium dan timbal yang telah dibersihkan diposisikan sedemikian rupa pada gelas kimia 200 mL yang berisi limbah buatan dengan jarak elektroda diatur disesuaikan dengan CCD. Selanjutnya, power supply DC dihubungkan ke elektroda dan arus listrik dialirkan dengan tegangan diatur disesuaikan dengan CCD. Proses elektrokoagulasi ini dilakukan dengan waktu diatur disesuaikan dengan CCD. Selama proses, pembentukan flok dan evolusi gas diamati. Selanjutnya fitrat hasil proses elektrokoagulasi disaring dan setelahnya dianalisis dengan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) dan hitung efisiensi penurunan kadar.

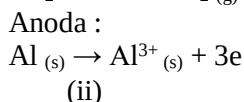
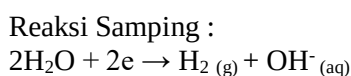
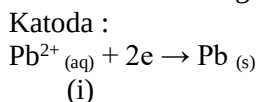
Analisis Data

Data hasil percobaan dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik Minitab (Minitab Versi 21.4.1). Data respons yang diperoleh dimasukkan ke dalam program, kemudian dilakukan analisis statistik untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap variabel respons melalui analisis varians (ANOVA) [9]. Uji signifikan dilakukan untuk menilai pengaruh masing-masing variabel serta interaksinya terhadap respons yang diamati. Model statistik yang dihasilkan dievaluasi berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2), nilai p-value, serta analisis residual plot untuk memastikan kesesuaian dan validitas model. Penentuan kondisi optimum dilakukan menggunakan fitur Respon Optimizer pada Minitab untuk memperoleh kombinasi variabel bebas yang menghasilkan nilai respons optimum sesuai dengan kriteria yang ditetapkan. Hasil optimasi didukung dengan analisis grafik berupa *contour plot* dan *surface plot*.

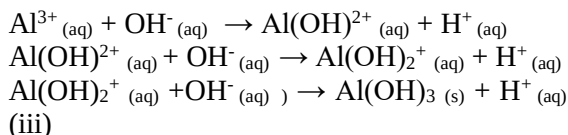
HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Elektrokoagulasi

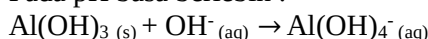
Proses elektrokoagulasi pada penelitian ini menggunakan aluminium (Al) sebagai anoda dan timbal (Pb) sebagai katoda, yang ditunjukkan oleh **Gambar I.**, sehingga reaksi yang terjadi pada anoda dan katoda sebagai berikut:



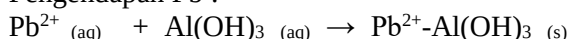
Reaksi yang terjadi pada aluminium ketika bereaksi didalam larutan :



Pada pH basa berlebih :



Pengendapan Pb :



(iv)

Gambar I. Mekanisme kerja proses elektrokoagulasi pada ion logam timbal (Pb^{2+})

Ketika arus listrik diberikan, reaksi reduksi berlangsung pada katoda. Ion Pb^{2+} menerima elektron dari katoda sehingga tereduksi menjadi logam Pb yang mengendap pada permukaan katoda, seperti pada persamaan reaksi (i) [10]. Selain itu, reduksi air juga dapat terjadi sebagai reaksi samping yang menghasilkan gas hidrogen

[11]. Secara bersamaan terjadi reaksi oksidasi pada anoda aluminium yang menghasilkan ion Al^{3+} , seperti pada persamaan reaksi (ii).

Ion tersebut selanjutnya mengalami hidrolisis dan bereaksi dengan ion OH^- yang terbentuk selama proses elektrolisis sehingga menghasilkan spesies hidroksida aluminium, terutama $\text{Al}(\text{OH})_3$, seperti persamaan reaksi (iii). Spesies $\text{Al}(\text{OH})_3$ berperan sebagai koagulan yang dapat mengadsorpsi dan mengikat ion Pb^{2+} sehingga terbentuk flok yang kemudian dapat dipisahkan dari larutan, seperti persamaan (iv). Mekanisme tersebut menyebabkan konsentrasi Pb^{2+} dalam larutan mengalami penurunan [10].

Pada katoda terjadi reaksi reduksi air yang menghasilkan gas hidrogen dan ion OH^- . Gas hidrogen yang terbentuk dapat membantu proses flotasi flok, sedangkan ion OH^- berperan dalam pembentukan hidroksida aluminium. Dengan demikian, proses penyisihan Pb^{2+} berlangsung melalui kombinasi pembentukan koagulan, adsorpsi, penjebakan dalam flok, pengendapan, dan pemisahan flok. Pembentukan flok yang semakin efektif selama proses juga menjadi salah satu alasan meningkatnya efisiensi pada waktu elektrokoagulasi hingga kondisi optimum.

Efisiensi Penurunan Kadar Ion Pb^{2+}

Pengujian ini dilakukan dengan sampel berupa larutan Pb 1500 ppm serta variasi pH (5, 7, dan 9), jarak elektroda (1, 2, dan 3 cm), tegangan (6, 9, dan 12 V), dan waktu elektrokoagulasi (30, 45, dan 60 menit) yang dapat dilihat di **Tabel II**. Hasil 31 percobaan menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi menghasilkan efisiensi penurunan Pb^{2+} yang sangat tinggi.

Efisiensi yang diperoleh berada pada rentang 98,5307–99,9971%. Nilai efisiensi tertinggi sebesar 99,9971% diperoleh pada pH 9, jarak elektroda 1 cm, tegangan 12 V, dan waktu 60 menit. Tingginya efisiensi menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda Al-Pb mampu menurunkan konsentrasi Pb^{2+} secara efektif. Pada proses tersebut, pelarutan elektroda aluminium menghasilkan spesies aluminium yang berperan sebagai koagulan, sementara proses elektrolisis juga menghasilkan gelembung gas yang dapat membantu proses pemisahan flok melalui mekanisme flotasi [3].

Akan tetapi, rentang efisiensi yang relatif sempit menunjukkan bahwa hampir seluruh perlakuan telah menghasilkan penyisihan Pb^{2+} yang sangat tinggi. Kondisi tersebut dapat menyebabkan

perbedaan pengaruh beberapa variabel menjadi sulit dibedakan secara statistik karena respons telah mendekati kondisi maksimum (removal saturation) [12].

Tabel II. Efisiensi Penurunan Kadar Ion Logam Timbal (Pb^{2+})

RunOrder	pH	Jarak Elektroda	Tegangan	Waktu	Efisiensi (%)
1	9	2	9	45	99,9945
2	7	2	9	45	99,9087
3	9	1	12	30	99,9492
4	5	3	6	30	98,5307
5	7	2	9	30	98,6728
6	7	2	9	45	99,5440
7	7	2	9	60	99,9886
8	7	2	9	45	99,9694
9	7	2	9	45	99,7186
10	5	2	9	45	99,8353
11	7	3	9	45	99,8587
12	9	1	12	60	99,9971
13	9	3	12	60	99,9950
14	5	3	6	60	99,3305
15	5	1	6	30	99,8986
16	7	2	9	45	99,9913
17	9	3	6	60	99,9806
18	5	3	12	30	99,1617
19	5	1	12	30	99,5759
20	7	2	12	45	99,9923
21	5	1	6	60	99,9822
22	7	2	9	45	99,9870
23	9	1	6	60	99,9955
24	7	2	9	45	99,9929
25	7	2	6	45	99,9881
26	9	3	6	30	99,9391
27	7	1	9	45	99,9939
28	5	3	12	60	99,9875
29	9	3	12	30	99,9322
30	5	1	12	60	99,4966
31	9	1	6	30	99,9657

Perhitungan Endapan Massa Logam Pb Berdasarkan Hukum Faraday

Hubungan antara jumlah listrik yang diberikan dan massa zat yang dihasilkan selama proses elektrolisis dapat dijelaskan menggunakan Hukum Faraday [6]. Secara teoritis, massa zat yang terbentuk atau terdeposit dapat dihitung berdasarkan jumlah arus listrik, waktu elektrolisis, massa molar, jumlah elektron yang terlibat, dan konstanta Faraday. Persamaan yang digunakan adalah:

$$m = \frac{e \times i \times t}{F} \quad (2)$$

Keterangan: m adalah massa zat, e adalah massa ekuivalen, i adalah kuat arus listrik, t adalah waktu, dan F adalah tetapan Faraday.

Tabel III. Perbandingan Massa Teoritis Pb Berdasarkan Hukum Faraday dengan Massa Aktual Logam Pb dan % Efisiensi Faraday serta Massa Pb di Koagulan Pada Proses Elektrokoagulasi Ion Logam Timbal (Pb^{2+})

RunOrder	Massa teoritis Pb (g)	Massa aktual Pb (g)	Efisiensi Hukum Faraday (%)	Massa Pb di Koagulan (g)
1	1,7394	0,1225	7,0427	0,1775
2	1,7394	0,1574	9,0491	0,1423
3	2,7638	0,0370	1,3387	0,2628
4	0,9856	0,2236	22,6867	0,0720
5	1,1596	0,0383	3,3029	0,2577
6	1,7394	0,0472	2,7136	0,2514
7	2,3192	0,1666	7,1835	0,1334
8	1,7394	0,0746	4,2888	0,2253
9	1,7394	0,1145	6,5827	0,1847
10	1,7394	0,1298	7,4623	0,1697
11	1,1306	0,0571	5,0504	0,2425
12	5,5276	0,0104	0,1881	0,2896
13	2,01	0,0770	3,8308	0,2230
14	1,3142	0,0855	6,5059	0,2125
15	0,9856	0,1357	13,7683	0,1640
16	1,7394	0,0117	0,6726	0,2883
17	1,3142	0,0265	2,0164	0,2734
18	0,6666	0,0913	13,6964	0,2062
19	2,7638	0,0804	2,9090	0,2183
20	2,3772	0,0217	0,9128	0,2783
21	1,9713	0,0491	2,4907	0,2508
22	1,7394	0,0983	5,6514	0,2017
23	1,9713	0,0366	1,8566	0,2634
24	1,7394	0,0678	3,8979	0,2322
25	1,2756	0,0081	0,6350	0,2919
26	0,6571	0,0454	6,9091	0,2544
27	2,1163	0,0240	1,1341	0,2760
28	2,01	0,1619	8,0547	0,1381
29	1,005	0,0288	2,8657	0,2710
30	5,5276	0,1054	1,9068	0,1931
31	0,9856	0,0495	5,0223	0,2504

Berdasarkan **Tabel III.** perbedaan antara massa teoritis dan massa aktual dapat terjadi karena Hukum Faraday menggambarkan kondisi ideal dengan asumsi bahwa seluruh arus listrik yang diberikan digunakan untuk reaksi elektrokimia yang

menghasilkan atau mengendapkan Pb [13]. Pada proses elektrokoagulasi, arus tidak hanya digunakan untuk proses reduksi Pb^{2+} , tetapi juga dapat terlibat dalam reaksi samping dan pembentukan spesies koagulan. Selain itu, sebagian Pb^{2+} dapat tersisihkan melalui mekanisme adsorpsi dan penjerapan oleh flok $Al(OH)_3$ sehingga tidak seluruh Pb yang tersisihkan berasal dari proses deposisi langsung pada katoda [14]. Hal tersebut menyebabkan massa aktual dapat berbeda dari massa teoritis berdasarkan Hukum Faraday.

Untuk mengetahui mekanisme penyisihan Pb yang lebih dominan, dilakukan perbandingan antara massa Pb yang terdeposit pada katoda dan massa Pb yang tersisihkan melalui koagulan. Hasil perhitungan yang terdapat pada **Tabel III**, menunjukkan secara rata-rata massa Pb yang terikat pada koagulan lebih besar dibandingkan massa Pb yang terdeposit pada katoda.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penyisihan Pb pada kondisi penelitian ini lebih dominan berlangsung melalui mekanisme koagulasi dibandingkan melalui reduksi elektrokimia secara langsung pada katoda. Dengan demikian, pembentukan flok hidroksida aluminium memiliki kontribusi yang lebih besar terhadap penyisihan Pb dari larutan dibandingkan deposisi Pb secara langsung pada katoda [4].

Analisis ANOVA

Analisis ANOVA dilakukan untuk mengetahui signifikansi pengaruh variabel proses terhadap respons efisiensi penurunan kadar ion logam timbal (Pb^{2+}) [6]. Variabel yang dianalisis meliputi pH, jarak elektroda, tegangan dan waktu elektrokoagulasi. Dalam analisis ANOVA, terhadap hasil *p-value*, dan lack of fit untuk setiap variabel, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel IV**.

Model memiliki *p-value* sebesar 0,019 ($<0,05$), sehingga model secara keseluruhan signifikan dalam menjelaskan hubungan variabel proses dengan efisiensi penurunan Pb^{2+} [6]. Faktor pH dan waktu menunjukkan pengaruh signifikan, sedangkan jarak elektroda dan tegangan tidak menunjukkan pengaruh signifikan secara statistik. Pengaruh signifikan pH menunjukkan bahwa perubahan kondisi keasaman larutan berperan dalam proses elektrokoagulasi. pH dapat memengaruhi spesiasi hidroksida aluminium dan proses pembentukan flok sehingga memengaruhi penyisihan Pb^{2+} [4]. Waktu elektrokoagulasi juga berpengaruh signifikan dengan *p-value* 0,016.

Semakin lama proses berlangsung, semakin banyak ion aluminium yang dapat dihasilkan dari anoda sehingga pembentukan koagulan dapat berlangsung lebih lanjut [4]. Selain faktor linear waktu, suku kuadrat waktu juga signifikan dengan *p-value* 0,011.

Tabel IV. ANOVA Ion logam timbal (Pb^{2+})

Source	F-Value	P-Value	Keterangan
Model	2,98	0,019	Signifikan
Linear	5,56	0,005	Signifikan
pH	11,49	0,004	Signifikan
Jarak Elektroda	3,37	0,085	Tidak Signifikan
Tegangan	0,17	0,688	Tidak Signifikan
Waktu	7,2	0,016	Signifikan
pH*pH	0,31	0,588	Tidak Signifikan
Jarak Elektroda*Jarak Elektroda	0,38	0,544	Tidak Signifikan
Tegangan*Tegangan	0,99	0,335	Tidak Signifikan
Waktu*Waktu	8,25	0,011	Signifikan
pH*Jarak Elektroda	2,93	0,106	Tidak Signifikan
pH*Tegangan	0,2	0,663	Tidak Signifikan
pH*Waktu	1,74	0,206	Tidak Signifikan
Jarak Elektroda*Tegangan	3,72	0,072	Tidak Signifikan
Jarak Elektroda*Waktu	2,25	0,153	Tidak Signifikan
Tegangan*Waktu	0,01	0,93	Tidak Signifikan
Error			
Lack-of-Fit	3,34	0,077	Tidak Signifikan
Pure Error			
Total			
R ²	72,31%		
Adjusted R ²	48,07%		

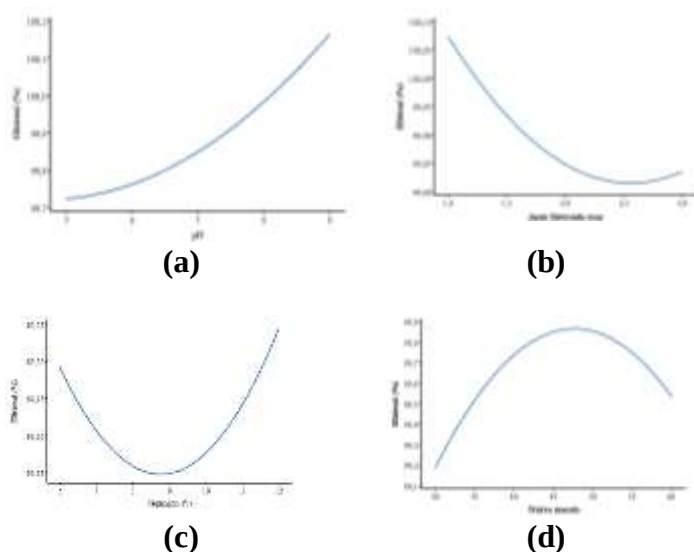
Model memiliki *p-value* sebesar 0,019 ($<0,05$), sehingga model secara keseluruhan signifikan dalam menjelaskan hubungan variabel proses dengan efisiensi penurunan Pb^{2+} [6]. Faktor pH dan waktu menunjukkan pengaruh signifikan, sedangkan jarak elektroda dan tegangan tidak menunjukkan pengaruh signifikan secara statistik. Pengaruh signifikan pH menunjukkan bahwa perubahan kondisi keasaman larutan berperan dalam proses elektrokoagulasi. pH dapat memengaruhi spesiasi hidroksida aluminium dan proses pembentukan flok sehingga memengaruhi penyisihan Pb^{2+} [4].

Waktu elektrokoagulasi juga berpengaruh signifikan dengan p-value 0,016. Semakin lama proses berlangsung, semakin banyak ion aluminium yang dapat dihasilkan dari anoda sehingga pembentukan koagulan dapat berlangsung lebih lanjut [4]. Selain faktor linear waktu, suku kuadratik waktu juga signifikan dengan p-value 0,011.

Nilai R^2 model sebesar 72,31%, yang berarti model mampu menjelaskan sekitar 72,31% variasi efisiensi penurunan Pb^{2+} . Sementara itu, adjusted R^2 sebesar 48,07% menunjukkan adanya beberapa suku model yang memberikan kontribusi relatif kecil terhadap respons. Nilai lack of fit sebesar 0,077 ($>0,05$) menunjukkan bahwa tidak terdapat lack of fit yang signifikan. Dengan demikian, tidak terdapat bukti statistik yang cukup untuk menyatakan bahwa model tidak sesuai dengan data eksperimen. Sebagian besar interaksi antarvariabel juga tidak menunjukkan pengaruh signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh masing-masing variabel terhadap respons cenderung bekerja secara independen dalam rentang kondisi penelitian.

Analisis Faktorial Plot

Analisis faktorial plot digunakan untuk melihat kecenderungan perubahan efisiensi akibat perubahan masing-masing faktor proses. Faktor yang dianalisis meliputi pH, jarak elektroda, tegangan, dan waktu seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar II.**



Gambar II. Pengaruh (a) pH, (b) Jarak Elektroda, (c) Tegangan, (d) Waktu terhadap efisiensi ion logam timbal (Pb^{2+})

Peningkatan pH yang ditunjukkan oleh **Gambar II. (a)** menunjukkan kecenderungan meningkatkan efisiensi penurunan Pb^{2+} . Kondisi pH memengaruhi pembentukan spesies koagulan dan kestabilan flok. Pada anoda aluminium, Al^{3+} yang terbentuk dapat bereaksi dengan OH^- membentuk $Al(OH)_3$ [11]. Peningkatan pH meningkatkan ketersediaan OH^- sehingga pembentukan flok $Al(OH)_3$ menjadi lebih efektif [10].

Pengaruh jarak elektroda yang ditunjukkan oleh **Gambar II. (b)** efisiensi cenderung meningkat pada jarak elektroda yang lebih dekat. Jarak elektroda berhubungan dengan resistansi larutan. Jarak yang lebih kecil dapat menurunkan hambatan listrik sehingga perpindahan arus dan pelarutan anoda menjadi lebih efektif [12]. Namun, berdasarkan ANOVA, jarak elektroda tidak berpengaruh signifikan ($p > 0,05$). Perbedaan efisiensi pada jarak 1–3 cm relatif kecil sehingga kecenderungan pada faktorial plot tidak dapat dianggap sebagai pengaruh nyata secara statistik.

Pengaruh tegangan yang ditunjukkan oleh **Gambar II. (c)** menunjukkan bahwa efisiensi sedikit menurun pada sekitar 9 V kemudian meningkat kembali pada 12 V sehingga membentuk pola kuadratik. Peningkatan tegangan dapat meningkatkan pelarutan anoda aluminium dan pembentukan Al^{3+} sehingga pembentukan koagulan meningkat [11]. Namun, faktor tegangan tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$). Oleh karena itu, pola tersebut merupakan kecenderungan model CCD dan bukan perbedaan nyata antarlevel tegangan.

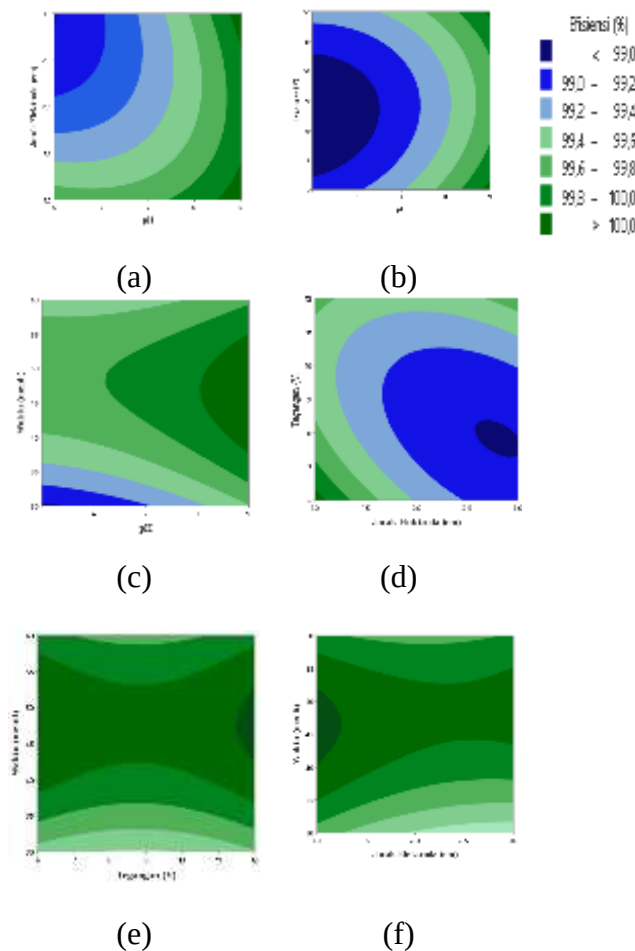
Pengaruh waktu yang ditunjukkan oleh **Gambar II. (d)** menunjukkan pola kuadratik. Efisiensi meningkat dari 30 menit hingga sekitar 47–48 menit, kemudian sedikit menurun hingga 60 menit. Kondisi ini menunjukkan adanya waktu optimum sekitar 48 menit. Peningkatan efisiensi pada awal proses berkaitan dengan bertambahnya pembentukan Al^{3+} dan $Al(OH)_3$ selama proses [10]. Setelah melewati waktu optimum, efisiensi dapat sedikit menurun akibat kejenuhan flok terhadap ion logam serta perubahan karakteristik flok akibat tumbukan antarflok dan gelembung [5].

Analisis Countour Plot

Contour plot digunakan untuk menggambarkan hubungan dua variabel terhadap respons dalam bentuk dua dimensi [15]. Secara umum, perubahan gradasi warna menunjukkan perubahan prediksi efisiensi seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar III.** Daerah berwarna

biru menunjukkan prediksi efisiensi yang relatif lebih rendah, sedangkan perubahan warna menuju hijau tua menunjukkan peningkatan respons hingga mendekati daerah optimum [13], [16][17].

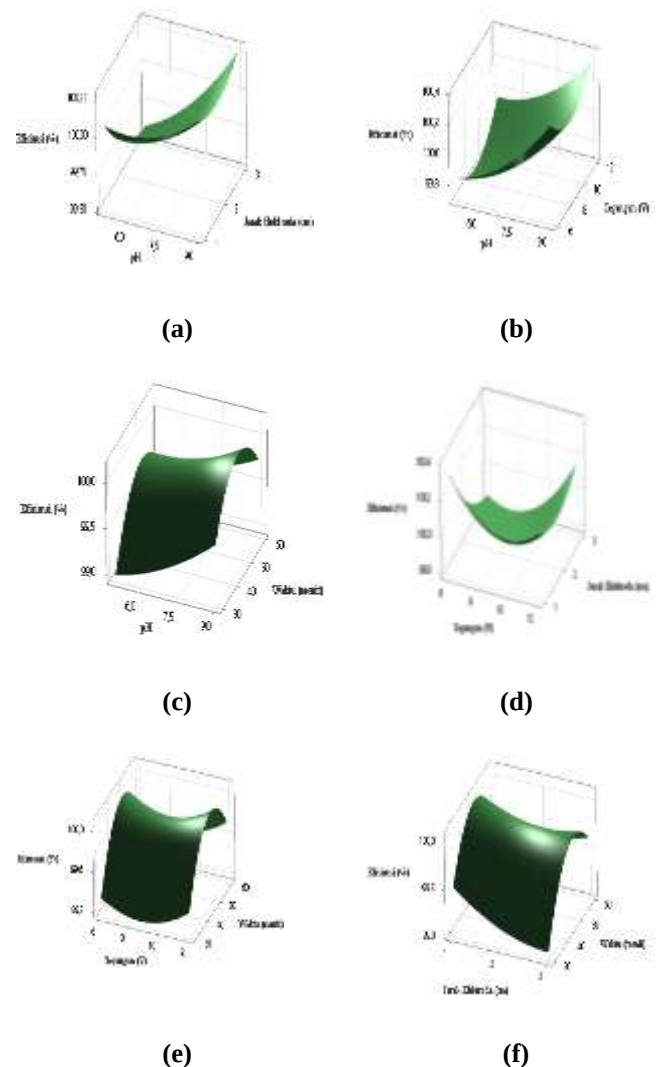
Bentuk kontur yang melengkung menunjukkan bahwa model CCD memprediksi hubungan kuadratik antara variabel proses dan respons. Namun, seluruh interaksi antarvariabel memiliki p-value > 0,05 sehingga interaksi tersebut tidak signifikan secara statistik. Oleh karena itu, contour plot terutama digunakan untuk menunjukkan kecenderungan respons berdasarkan model RSM, bukan sebagai bukti adanya interaksi yang signifikan.



Gambar III. Countour plot pengaruh dua variabel terhadap efisiensi penurunan kadar ion logam timbal (Pb^{2+}): (a) pH-Jarak Elektroda, (b) pH-Tegangan, (c) pH-Waktu, (d) Jarak Elektroda-Tegangan, (e) Tegangan-Waktu, dan (f) Jarak Elektroda-Waktu

Analisis Surface Plot

Surface plot merupakan representasi tiga dimensi dari hubungan dua variabel dengan respons [15]. Permukaan yang lebih tinggi menunjukkan prediksi efisiensi yang lebih besar, sedangkan permukaan yang lebih rendah menunjukkan efisiensi yang lebih kecil seperti yang ditunjukkan oleh Gambar IV.. Permukaan pada keenam kombinasi menunjukkan perubahan yang relatif bertahap dan tidak membentuk puncak atau lembah yang sangat tajam. Bentuk permukaan yang melengkung menunjukkan adanya kecenderungan hubungan kuadratik yang digunakan dalam pemodelan CCD [13] [16], [17].



Gambar IV. Surface plot pengaruh dua variabel terhadap efisiensi penurunan kadar ion logam timbal (Pb^{2+}): (a) pH-Jarak Elektroda, (b) pH-Tegangan, (c) pH-Waktu, (d) Jarak Elektroda-Tegangan, (e) Tegangan-Waktu, dan (f) Jarak Elektroda-Waktu

Beberapa permukaan menunjukkan kecenderungan menuju daerah dengan respons lebih tinggi. Namun, karena hasil ANOVA menunjukkan seluruh interaksi antarvariabel tidak signifikan, surface plot pada penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai visualisasi kecenderungan respons model, bukan untuk menyimpulkan adanya interaksi yang signifikan.

Optimasi Menggunakan Central Composite Design (CCD)

Optimasi menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dalam rancangan *Central Composite Design* (CCD) pada Minitab menghasilkan kondisi operasi optimum seperti pada **Gambar V**. Hasil validasi eksperimen pada kondisi optimum menghasilkan efisiensi sebesar 99,9061%.



Gambar V. Grafik pengukuran kondisi optimum

Sementara itu, efisiensi eksperimen maksimum sebesar 99,9971% diperoleh pada kondisi pH 9, jarak elektroda 1 cm, tegangan 12 V, dan waktu 60 menit. Perbedaan antara kondisi optimum model dan kondisi eksperimen maksimum seperti pada **Tabel IV**, menunjukkan bahwa optimasi CCD tidak semata-mata memilih respons eksperimen tertinggi, tetapi mencari kombinasi variabel yang memberikan kondisi optimum berdasarkan model yang dibangun dari keseluruhan data [15].

Kondisi model menggunakan waktu yang lebih singkat, yaitu 48 menit dibandingkan 60 menit, dengan efisiensi yang tetap sangat tinggi. Dengan demikian, kondisi pH 9, jarak elektroda 3 cm, tegangan 12 V, dan waktu 48 menit dapat digunakan sebagai kondisi optimum berdasarkan model CCD, dengan efisiensi penurunan Pb^{2+} sebesar 99,9061%.

Tabel IV. Efisiensi Proses Elektrokoagulasi Ion logam timbal (Pb^{2+}) Pada Kondisi Optimum

Kondisi	pH	Jarak Elektroda (Cm)	Tegangan (V)	Waktu (Menit)	Efisiensi (%)
Optimum Model RSM	9	3	12	48	99,9061
Maksimum Eksperimen	9	1	12	60	99,9971

Kondisi model menggunakan waktu yang lebih singkat, yaitu 48 menit dibandingkan 60 menit, dengan efisiensi yang tetap sangat tinggi. Dengan demikian, kondisi pH 9, jarak elektroda 3 cm, tegangan 12 V, dan waktu 48 menit dapat digunakan sebagai kondisi optimum berdasarkan model CCD, dengan efisiensi penurunan Pb^{2+} sebesar 99,9061%.

SIMPULAN

Proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda Al-Pb efektif dalam menurunkan kadar ion Pb^{2+} pada simulasi limbah cair electroplating, dengan efisiensi penurunan sebesar 98,5307–99,9971%. Berdasarkan analisis CCD, pH dan waktu elektrokoagulasi memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi penurunan Pb^{2+} , sedangkan jarak elektroda dan tegangan tidak memberikan pengaruh signifikan pada rentang kondisi yang digunakan. Kondisi optimum berdasarkan model diperoleh pada pH 9, jarak elektroda 3 cm, tegangan 12 V, dan waktu 48 menit dengan hasil validasi eksperimen sebesar 99,9061%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung atas dukungan fasilitas dan akademik selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing serta pihak-pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama penelitian hingga penyusunan artikel ini.

REERENSI

- [1] Z. Prihatini and Y. W. Utomo, "Studi: Air Sungai di Indonesia Tercemar Logam

- Berat, Mayoritas Ada di Jawa,” Kompas. Accessed: Jul. 18, 2026. [Online]. Available: <https://share.google/VrfZRi9TgiN9WXHi>
- [2] N. Redationo, C. Mannuel, and D. Murdiyanto, “Impact of Anode-Cathode Distance Variations on Nickel Electroplating of Aisi 1020 Steel: Hardness and Corrosion Rate Analysis,” *Mech. Energy Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 07–15, 2024, doi: 10.59581/metal.v2i1.90.
- [3] C. Huang, S. Shen, C. Dong, M. Kumar, and J. Chang, “Removal Mechanism and Effective Current of Electrocoagulation for Treating Wastewater,” *Water*, vol. 12, no. 2614, pp. 1–14, 2020.
- [4] A. Prasetyaningrum, D. Ariyanti, W. Widayat, and B. Jos, “Copper and lead ions removal by electrocoagulation: Process performance and implications for energy consumption,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 10, no. 3, pp. 415–424, 2021, doi: 10.14710/ijred.2021.31665.
- [5] J. . Al-Marri, A. . Abouedwan, M. . Ahmad, and N. Bensalah, “Electrocoagulation using aluminum electrodes as a sustainable and economic method for the removal of kinetic hydrate inhibitor (polyvinyl pyrrolidone) from produced wastewaters,” *Front. Water*, vol. 5, 2023, doi: 10.3389/frwa.2023.1305347.
- [6] F. AlJaberi and Z. Hawaas, “Electrocoagulation removal of Pb, Cd, and Cu ions from wastewater using a new configuration of electrodes,” *MethodsX*, vol. 10, p. 101951, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2022.101951.
- [7] A. Batrisyia, H. Kamyab, and S. Chelliapan, “Treatment of Wastewater Using Response Surface Methodology: A Brief Review,” vol. 78, pp. 535–540, 2020, doi: 10.3303/CET2078090.
- [8] B. S. Nasional., “Air dan air limbah-Bagian 8: Cara uji timbal (Pb) dengan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala (SNI 06-6989.8-2004),” pp. 1–9, 2004.
- [9] M. Lubis, A. Chairunnisak, B. Arifin, and B. Aceh, “Comparison of Palm Oil Mill Effluent Electrocoagulation by Using Fe-Fe and Al-Al Electrodes: Box-Behnken Design,” *AJChE*, vol. 18, no. 1, pp. 30–43, 2018.
- [10] D. Moussa, M. El-naas, M. Nasser, and M. Al-marri, “A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges,” *J. Environ. Manage.*, pp. 1–18, 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.10.032.
- [11] Y. Rohmatulloh, N. Mawadah, and E. Hadisantoso, “Efisiensi Penurunan Kadar Logam Tembaga (Cu) Pada Limbah Cair Industri Electroplating,” *Gunung Djati Conf. Ser.*, vol. 58, pp. 177–183, 2025.
- [12] Z. Al-qodah and M. Al-shannag, “Heavy Metal Ions Removal From Wastewater Using Electrocoagulation Processes: A Comprehensive Review,” *Sep. Sci. Technol.*, vol. 6395, 2017, doi: 10.1080/01496395.2017.1373677.
- [13] A. Moneer, W. Thabet, M. Khedawy, M. El-Sadaawy, and N. Shaaban, “Electrocoagulation process for oily wastewater treatment and optimization using response surface methodology,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 12, pp. 13859–13872, 2023, doi: 10.1007/s13762-023-05003-7.
- [14] M. Joning, L. Melawaty, and R. S. Sarungallo, “Metode Elektrokoagulasi Untuk Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Yang Mengandung Logam-Logam Berat,” *Chem. Eng. J.*, vol. 1, pp. 1–14, 2022.
- [15] S. Jasem, M. Breig, K. Jaber, and K. Luti, “Materials Today : Proceedings Response surface methodology: A review on its applications and challenges in microbial cultures,” *Mater. Today Proc.*, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.316.



- [16] S. Patel and S. Parikh, "Statistical optimizing of electrocoagulation process for the removal of Cr(VI) using response surface methodology and kinetic study," *Arab. J. Chem.*, vol. 13, no. 9, pp. 7032–7044, 2020, doi: 10.1016/j.arabjc.2020.07.009.
- [17] A. Morales-Figueroa, E. Teutli-Sequeira, I. Linares-Hernández, V. Martínez-Miranda, M. García-Morales, and G. Roa-Morales, "Optimization of the Electrocoagulation Process with Aluminum Electrodes for Rainwater Treatment," *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.860011.