

Optimasi Proses Reduksi dan Flokulasi Cr(VI) oleh FeSO₄ pada Limbah Simulasi Elektroplating

Riska Mardiyanti¹, Djabal Nur Basir², Abdurrahman Noval Musallam³, Muhammad Al Mustawa⁴

Universitas Hasanuddin,^{1,2,3,4}

riskamardiyanti@unhas.ac.id¹, djabalnurbasir@unhas.ac.id², nbamusallam@gmail.com³,
malmustawa@unhas.ac.id⁴

Corresponding Author: Djabal Nur Basir, E-mail: djabalnurbasir@unhas.ac.id

ABSTRACT

The increasing activity of the electroplating industry contributes to environmental pollution through wastewater containing toxic and carcinogenic hexavalent chromium [Cr (VI)]. This study aimed to determine the optimum conditions for Cr (VI) reduction–flocculation using iron (II) sulfate (FeSO₄) and to evaluate its application in simulated multi-metal electroplating wastewater. Batch optimization was conducted by varying pH (3–11), contact time (1–60 minutes), FeSO₄ dosage (0.01–0.3 g), and initial Cr(VI) concentration (50–500 mg/L). Cr (VI) concentration was analyzed using UV–Vis spectrophotometry with 1,5-diphenylcarbazide reagent at a maximum wavelength of 541.5 nm. The optimum conditions were obtained at pH 8, 5 minutes of contact time, and 0.1 g of FeSO₄, achieving 99.89% removal of Cr (VI) from an initial concentration of 100 mg/L. In simulated multi-metal wastewater, the removal efficiency reached 99.9% with a final concentration of 0.0921 mg/L, meeting the applicable discharge standards. These findings provide practical implications as initial operational parameters and demonstrate the potential of FeSO₄ as a simple and rapid pre-treatment method prior to further treatment processes. Further studies are recommended to validate the method using actual electroplating wastewater and to evaluate the influence of interfering ions and Fe²⁺ oxidation, for example through operational control or the use of freshly prepared FeSO₄ solution to ensure process stability.

KEYWORDS

Iron(II) Sulfate, Electroplating, Flocculation, Hexavalent chromium, Reduction.

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v5i2.405>

A. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan kekayaan energi dan sumber daya mineral (ESDM) yang melimpah, sehingga memiliki peran strategis dalam mendukung pembangunan nasional, khususnya pada sektor industri dan ekonomi ([Kementerian ESDM, 2019](#)). Pemanfaatan sumber daya mineral tersebut memberikan kontribusi signifikan terhadap pertumbuhan industri dan kesejahteraan masyarakat. Namun, perkembangan industri yang pesat juga diiringi dengan meningkatnya produksi limbah, terutama limbah cair berbahaya yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik ([Martini dkk., 2020](#)). Pengelolaan limbah industri yang tidak optimal dapat menimbulkan dampak serius terhadap keseimbangan ekosistem dan kesehatan manusia ([Singh et al., 2023](#)).

Salah satu sektor industri yang berkontribusi besar terhadap pencemaran lingkungan adalah industri elektroplating, baja, galvanisasi, serta produksi printed circuit boards (PCBs) ([Sutisna, 2024](#)). Industri-industri tersebut menghasilkan limbah cair yang mengandung berbagai logam berat, termasuk kromium, yang dikenal memiliki sifat toksik dan karsinogenik ([Kapoor et al., 2022](#); [Alfaini & Sa'diyah, 2023](#)). Kromium merupakan unsur transisi dengan beberapa tingkat valensi dan menempati urutan ke-17 sebagai unsur paling melimpah di kerak bumi ([Prasetyo, 2023](#)). Secara alami, kromium ditemukan dalam bentuk mineral kromit (FeCr_2O_4) atau berasosiasi dengan logam lain seperti besi dan timbal ([Harwan dkk., 2024](#)). Namun, dalam beberapa dekade terakhir, peningkatan aktivitas industri yang menggunakan senyawa kromium telah menyebabkan meningkatnya pencemaran lingkungan oleh logam ini ([Liu dkk., 2020](#)). Di antara berbagai bentuk oksidasi kromium, kromium heksavalen [Cr(VI)] merupakan spesies yang paling berbahaya karena memiliki toksisitas tinggi, mobilitas besar, serta kelarutan yang tinggi dalam air dibandingkan dengan kromium trivalen [Cr(III)] ([Kapoor, 2022](#)). Paparan Cr(VI) dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan mutasi DNA, kerusakan kromosom, serta efek genotoksik yang berkontribusi terhadap perkembangan kanker ([DesMarais & Costa, 2019](#); [Handa & Jindal, 2020](#)). Meskipun Cr(VI) tidak secara langsung merusak DNA, senyawa ini memerlukan proses aktivasi reduktif dalam sel untuk memicu efek genotoksiknya.

Limbah yang mengandung kromium diklasifikasikan sebagai limbah bahan beracun dan berbahaya (B3) sesuai dengan regulasi lingkungan ([Sy dkk., 2016](#)). Di dalam ekosistem perairan, kromium cenderung mengalami proses biokonsentrasi, bioakumulasi, dan biomagnifikasi, yang menyebabkan peningkatan konsentrasi logam berat dalam rantai makanan dan memperparah dampak ekologisnya ([Ali et al., 2019](#)). Selain itu, kromium bersifat persisten dan sulit terdegradasi secara alami, sehingga diperlukan strategi remediasi yang efektif untuk menurunkan kadar kromium sebelum dibuang ke lingkungan ([Prastyo dkk., 2016](#)).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menanggulangi pencemaran kromium dalam limbah cair, antara lain koagulasi-presipitasi-filtrasi (CPF), adsorpsi, pertukaran ion, teknologi membran-elektrodialisis, serta bioremediasi. Metode CPF merupakan salah satu pendekatan konvensional yang paling banyak digunakan karena biaya operasionalnya relatif rendah, sederhana, dan mudah diaplikasikan dalam skala industri ([Murwanto, 2021](#); [Montes-Bujaico et al., 2025](#)). Proses CPF umumnya menggunakan koagulan berbasis aluminium atau besi untuk mengendapkan zat pengotor dalam air limbah. Namun, tidak semua jenis koagulan efektif dalam mengolah limbah yang mengandung Cr(VI) . Beberapa penelitian melaporkan bahwa koagulan berbasis besi(III) memiliki efektivitas yang rendah dalam menurunkan kadar Cr(VI) , sedangkan besi(II) sulfat menunjukkan kemampuan yang tinggi dalam mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dengan efisiensi mendekati 100% ([Majalis dkk., 2022](#)).

Keunggulan besi(II) sulfat terletak pada kemampuannya berfungsi ganda sebagai agen reduktor sekaligus koagulan, sehingga memungkinkan proses reduksi Cr(VI) dan pembentukan flok Cr(III) berlangsung secara simultan ([Zhang et al., 2023](#)). Selain itu, besi(II) sulfat memiliki ketersediaan yang luas di pasaran, harga yang relatif terjangkau, serta efektif bekerja pada rentang pH 5–9 dengan dosis optimal 3–5 kali konsentrasi Cr(VI) . Oleh karena itu, besi(II) sulfat menjadi salah satu pilihan utama dalam pengolahan limbah industri yang mengandung kromium karena efisien dan ekonomis. Seiring meningkatnya produksi industri yang melibatkan kromium, pengembangan metode pengolahan limbah yang lebih efektif, cepat, dan ramah lingkungan menjadi semakin mendesak ([Das et al., 2023](#)). Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kondisi proses reduksi dan flokulasi Cr(VI) menggunakan besi(II) sulfat, khususnya dalam sistem yang mensimulasikan limbah elektroplating multilogam. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada

optimasi parameter pH, waktu kontak, dan dosis koagulan FeSO_4 dalam menurunkan kadar Cr(VI) serta aplikasinya pada limbah simulasi elektroplating.

B. Metodologi

1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan meliputi FeSO_4 sebagai koagulan, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Merck) sebagai sumber Cr(VI) , $\text{Cr(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Merck), $\text{NH}_4\text{Fe(SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Merck), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Merck), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Merck), $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Merck), 1,5-Difenilkarbazid 0,5% (Merck), aseton (Merck), HCl (Merck), H_2SO_4 (Merck), NaOH (Merck), akuades, kertas saring Whatmann No. 42, dan kertas *tissue*.

2. Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah pH meter, mikro buret, pipet skala, neraca analitik Ohaus, pipet volume, karet penghisap, batang pengaduk, gelas kimia, botol semprot, labu ukur, corong, spatula, *magnetic stirrer*, *magnetic bar*, *timer*, spektrofotometer UV-Vis Shimadzu, dan pH meter.

3. Prosedur Penelitian

Persiapan Larutan dan Reagen. Seluruh larutan disiapkan menggunakan akuades dan mengacu pada standar yang berlaku. Larutan induk Cr(VI) 1000 mg/L dibuat dengan memanaskan kristal $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ selama 1 jam, kemudian sebanyak 0,2827 g kristal ditimbang dan dilarutkan dalam labu ukur 100 mL hingga tanda batas sesuai dengan metode SNI 6989.71-2009. Larutan standar intermediet dan deret standar Cr(VI) (0–1 mg/L) disiapkan melalui pengenceran bertahap dari larutan induk. Reagen pengompleks 1,5-difenilkarbazid 0,5% dibuat dengan melarutkan 0,25 g 1,5-difenilkarbazid dalam 50 mL aseton (Andini, 2017). Larutan HCl dan NaOH dengan rentang konsentrasi 0,00001 M hingga 1 M disiapkan melalui pengenceran bertingkat untuk keperluan pengaturan pH. Larutan kerja Cr(VI) 100 mg/L dibuat dengan pengenceran larutan induk dan diatur pada variasi pH 3–11 menggunakan HCl atau NaOH , kemudian dikontrol menggunakan pH meter.

Preparasi Limbah Simulasi Elektroplating. Limbah simulasi elektroplating disiapkan dengan melarutkan sejumlah garam logam ke dalam 1 liter akuades untuk memperoleh sistem multilogam. Komposisi akhir logam dalam larutan simulasi terdiri atas Cr(VI) 90 mg/L, Cr(III) 90 mg/L, Fe 24 mg/L, Cu 46,5 mg/L, Mn 19,5 mg/L, Ni 13,5 mg/L, dan Zn 16,5 mg/L, mengacu pada metode yang dilaporkan oleh Nurhasni dkk. (2013). Larutan dihomogenkan menggunakan pengaduk magnetik sebelum digunakan pada tahap aplikasi.

Optimasi Proses Reduksi dan Flokulasi Cr(VI) . Proses optimasi dilakukan secara batch menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Parameter yang dioptimasi meliputi pH (3–11), waktu kontak (1–60 menit), dosis koagulan FeSO_4 (0,01–0,3 g), dan konsentrasi awal Cr(VI) (50–500 mg/L). Sejumlah 50 mL larutan Cr(VI) dimasukkan ke dalam gelas kimia, kemudian pH larutan diatur sesuai variasi yang ditentukan. Koagulan FeSO_4 ditambahkan sesuai dosis yang ditetapkan, kemudian campuran diaduk selama waktu kontak yang telah ditentukan. Setelah proses reaksi selesai, campuran disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42 untuk memisahkan endapan hasil flokulasi. Filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis kadar Cr(VI) sisa menggunakan metode kolorimetri difenilkarbazid. Filtrat terlebih dahulu dikondisikan pada $\text{pH } 2,0 \pm 0,5$, kemudian ditambahkan reagen 1,5-difenilkarbazid dan diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum sesuai SNI 6989.71-2009. Seluruh pengujian dilakukan secara duplo.

Analisis Data. Efisiensi penurunan kadar Cr(VI) dihitung menggunakan Persamaan (1):

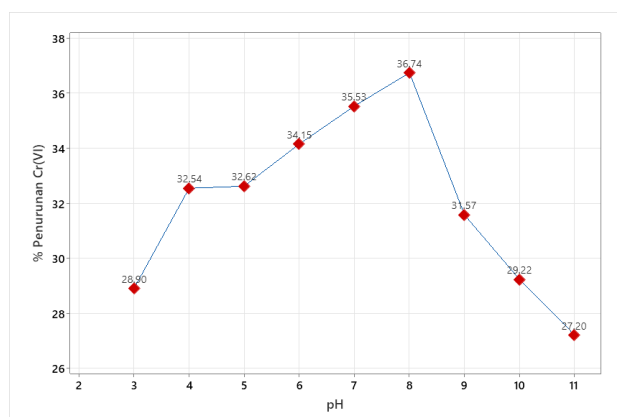
$$\% \text{ Penurunan} = \frac{C_{\text{awal}} - C_{\text{akhir}}}{C_{\text{awal}}} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana C_{awal} adalah konsentrasi Cr(VI) awal (mg/L) dan C_{akhir} adalah konsentrasi Cr(VI) setelah proses reduksi dan flokulasi (mg/L).

Uji Aplikasi pada Limbah Simulasi: Kondisi optimum yang diperoleh dari tahap optimasi (pH, waktu kontak, dan dosis koagulan) diaplikasikan pada 50 mL sampel limbah simulasi elektroplating. Prosedur perlakuan dilakukan dengan menambahkan koagulan FeSO_4 sesuai dosis optimum, kemudian campuran diaduk selama waktu kontak optimum. Setelah itu, larutan disaring dan filtrat dianalisis kadar Cr(VI) sisa menggunakan metode yang sama seperti pada tahap optimasi untuk mengevaluasi efektivitas metode pada sistem multilogam.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

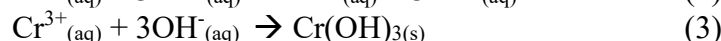
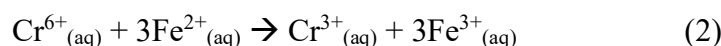
Proses reduksi dan flokulasi Cr(VI) menggunakan koagulan FeSO_4 dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pH, waktu kontak, dosis koagulan, dan konsentrasi awal Cr(VI) terhadap efisiensi penurunan Cr(VI) dalam larutan sebelum diaplikasikan pada limbah simulasi elektroplating multilogam. Pada sistem ini, Cr(VI) direduksi menjadi Cr(III) oleh Fe^{2+} pada kondisi asam, kemudian Cr(III) terhidrolisis dan terflokulasi sebagai $\text{Cr}(\text{OH})_3$ pada pH mendekati netral hingga basa.



Gambar 1. Grafik Hubungan antara pH dengan % Penurunan Kadar Cr(VI)

Pengaruh pH terhadap efisiensi penurunan Cr(VI) ditunjukkan pada Gambar 1. Peningkatan efisiensi penurunan Cr(VI) pada pH 3–8 menunjukkan bahwa kondisi tersebut mendukung berlangsungnya reaksi reduksi Cr(VI) oleh Fe^{2+} sekaligus pembentukan endapan $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Pada pH rendah, Fe^{2+} berperan dominan sebagai agen pereduksi, sedangkan pada pH mendekati netral hingga sedikit basa, proses hidrolisis Cr(III) dan pembentukan flok $\text{Cr}(\text{OH})_3$ berlangsung lebih efektif ([Nurhayati, dkk., 2020](#))

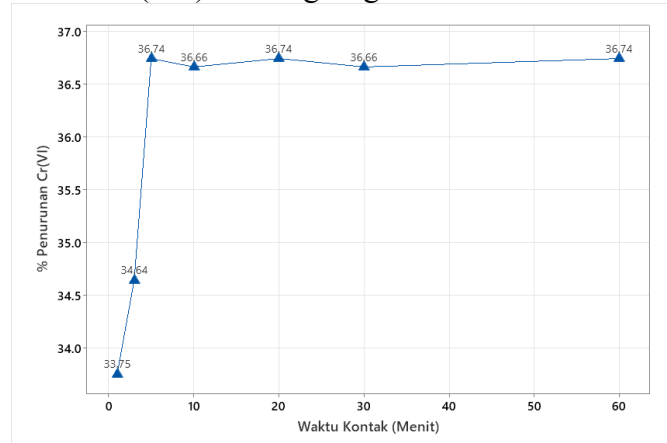
Mekanisme reduksi Cr(VI) oleh Fe^{2+} ditunjukkan pada reaksi (2), sedangkan reaksi (3) menggambarkan pembentukan endapan $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yang selanjutnya terflokulasi dan terpisah dari larutan.



Persen penurunan kadar krom(VI) mengalami penurunan pada pH 9 hingga pH 11 dari 31,57% ke 27,20%. Penurunan efisiensi pada pH 9–11 dikaitkan dengan berkurangnya efektivitas reaksi reduksi serta meningkatnya kompetisi ion hidroksida yang dapat mengganggu interaksi Fe^{2+} dengan

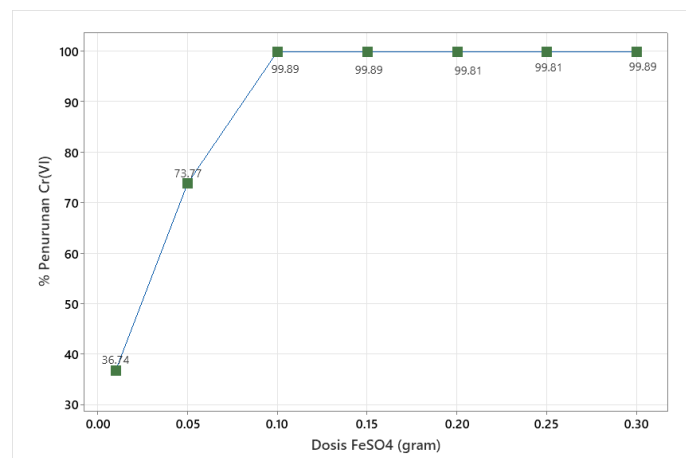
Cr(VI). Selain itu, pada pH tinggi terjadi peningkatan kelarutan relatif spesies Cr(III) terkompleks sehingga proses pembentukan flok $\text{Cr}(\text{OH})_3$ menjadi kurang optimal (Ardiansyah dkk., 2018). Kondisi optimum didapatkan pada pH 8, hal ini menunjukkan pada pH tersebut proses reduksi dan flokulasi terjadi secara bersamaan dan telah mencapai maksimum pada proses penurunan ion krom(VI) dalam larutan. Reduksi Cr(VI) oleh FeSO_4 berlangsung lebih efektif pada kondisi asam, sedangkan proses koagulasi dan flokulasi berlangsung optimal pada suasana basa (Nguyen dkk., 2021).

Pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi penurunan Cr(VI) ditunjukkan pada Gambar 2. Peningkatan efisiensi penurunan Cr(VI) hingga waktu kontak 5 menit menunjukkan bahwa proses reduksi dan flokulasi berlangsung cepat dengan kinetika reaksi yang tinggi dan hambatan difusi yang minimal. Setelah 5 menit, tidak terjadi peningkatan signifikan, mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai kondisi mendekati kesetimbangan. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara Fe^{2+} dan Cr(VI) serta pembentukan flok $\text{Cr}(\text{OH})_3$ berlangsung secara efisien dalam waktu singkat.



Gambar 2. Pengaruh waktu konsentrasi terhadap efisiensi penurunan Cr(IV) menggunakan FeSO_4

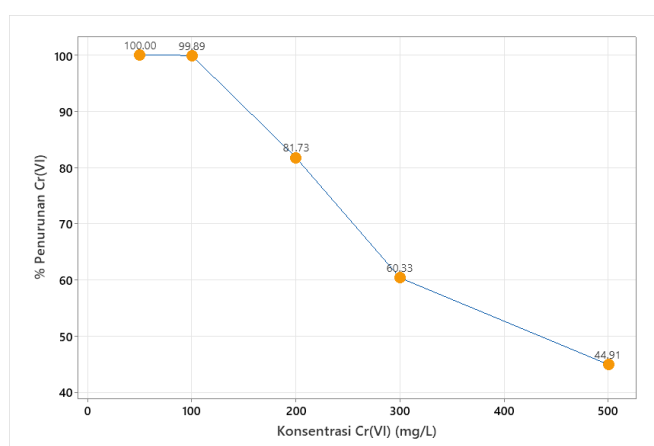
Dosis koagulan merupakan salah satu parameter kunci dalam menentukan keberhasilan proses reduksi dan flokulasi Cr(VI). Pengaruh penambahan dosis optimum koagulan besi(II) sulfat dilakukan dengan menggunakan pH optimum yaitu pH 8 dan waktu kontak optimum yaitu selama 5 menit.



Gambar 3. Grafik antara Dosis Kuagulan dengan % Penurunan Konsentrasi Cr(VI)

Peningkatan dosis FeSO_4 hingga 0,1 g menyebabkan kenaikan signifikan efisiensi penurunan Cr(VI) pada Gambar 3, dengan nilai maksimum sebesar 99,89% untuk larutan Cr(VI) 100 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa pada dosis tersebut jumlah Fe^{2+} yang tersedia telah mencukupi untuk mereduksi dan mengendapkan Cr(VI) secara optimal. Dosis koagulan yang berlebih juga dapat menambah biaya serta dapat menyebabkan proses restabilisasi. Penurunan efisiensi pada dosis koagulan yang lebih tinggi dikaitkan dengan fenomena restabilisasi partikel akibat kelebihan muatan positif pada permukaan flok, sehingga gaya tolak-menolak elektrostatis meningkat dan partikel kembali terdispersi dalam larutan (Alabi et al., 2025; Wang, K.-J., & Wang, P.-S., 2025).

Pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) terhadap efisiensi reduksi dan flokulasi dievaluasi pada kondisi optimum yang telah diperoleh, yaitu dosis FeSO_4 0,1 g, waktu kontak 5 menit, dan pH 8. Hasil pengukuran konsentrasi Cr(VI) dengan penambahan koagulan besi(II) sulfat didapatkan grafik hubungan antara persen penurunan kadar Cr(VI) dengan konsentrasi Cr(VI).



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) terhadap efisiensi penurunan Cr(VI) menggunakan FeSO_4 pada pH 8 dan waktu kontak 5 menit

Pada konsentrasi awal Cr(VI) 50 dan 100 mg/L, efisiensi penurunan masing-masing mencapai 100% dan 99,86%, menunjukkan bahwa jumlah Fe^{2+} yang tersedia pada dosis 0,1 g masih mencukupi untuk mereduksi dan mengendapkan Cr(VI) secara optimal. Namun, peningkatan konsentrasi Cr(VI) menjadi 200, 300, dan 500 mg/L menyebabkan penurunan efisiensi menjadi 81,73%, 60,33%, dan 44,91%. Data tersebut menunjukkan bahwa dosis koagulan 0,1 g efektif mereduksi Cr(VI) hingga konsentrasi 100 mg/L, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi diperlukan penambahan dosis FeSO_4 untuk mempertahankan efisiensi penurunan yang tinggi.

Penurunan efisiensi pada konsentrasi Cr(VI) di atas 100 mg/L menunjukkan keterbatasan jumlah Fe^{2+} yang tersedia sebagai agen pereduksi. Pada konsentrasi Cr(VI) yang lebih tinggi, rasio stoikiometri Fe^{2+} terhadap Cr(VI) menjadi tidak mencukupi sehingga tidak seluruh Cr(VI) dapat direduksi menjadi Cr(III) dan selanjutnya terflokulasi sebagai $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Oleh karena itu, pada konsentrasi Cr(VI) yang tinggi diperlukan penambahan dosis FeSO_4 untuk mempertahankan efisiensi penurunan yang tinggi.

Kondisi optimum yang diperoleh selanjutnya diaplikasikan pada limbah simulasi elektroplating multilogam untuk mengevaluasi efektivitas metode dalam sistem yang lebih kompleks. Hasil aplikasi pada limbah simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi akhir Cr(VI) sebesar 0,0921 mg/L dengan efisiensi penurunan 99,9% (Tabel 1), yang telah memenuhi baku mutu air limbah elektroplating ($<0,1$ mg/L) sesuai dengan [Peraturan Pemerintah nomor 22 \(2021\)](#).

Tabel 1. Hasil Aplikasi Kondisi Optimum Pada Limbah Simulasi Elektrolating

Sampel Limbah Setelah Reduksi	Absorbansi	Konsentrasi Cr(VI) (mg/L)	% Penurunan Cr(VI)
	0,02	0,09	99,99

Tingginya efisiensi penurunan Cr(VI) pada sistem multilogam menunjukkan bahwa FeSO_4 memiliki selektivitas yang baik terhadap Cr(VI) meskipun terdapat ion logam lain sebagai kompetitor, seperti Fe, Cu, Ni, Mn, dan Zn (Long et al., 2022). Hal ini mengindikasikan bahwa proses reduksi dan flokulasi Cr(VI) oleh FeSO_4 tidak terganggu secara signifikan oleh keberadaan ion-ion lain, sehingga metode ini berpotensi diaplikasikan pada limbah elektrolating nyata yang bersifat kompleks.

Efisiensi penurunan Cr(VI) pada penelitian ini tergolong tinggi dan berada pada kisaran yang sebanding dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa Fe(II) sulfat mampu mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dengan efisiensi mendekati 100%. Pada kondisi optimum yang diperoleh (pH 8, waktu kontak 5 menit, dosis FeSO_4 0,1 g untuk Cr(VI) awal 100 mg/L), efisiensi penurunan mencapai 99,89%, yang menunjukkan bahwa FeSO_4 bekerja sangat efektif melalui mekanisme reduksi dan koagulasi/flokulasi yang berlangsung simultan sehingga memudahkan pemisahan. Hasil ini juga konsisten dengan temuan studi lain, misalnya Majalis et al. (2022) yang melaporkan penurunan Cr(VI) 98,18–99,09% pada kondisi batch dan 98,46–100% pada operasi kontinu menggunakan sumber Fe(II) dari nickel slag, Stylianou et al. (2018) yang menunjukkan reduksi oleh Fe(II) mampu menurunkan Cr(VI) hingga di bawah 10 $\mu\text{g/L}$ dari konsentrasi awal 300 $\mu\text{g/L}$, serta Nurhayati et al. (2020) yang melaporkan penurunan krom total 99,2–99,9% melalui kombinasi pengenceran, koagulasi, dan adsorpsi.

Penggunaan FeSO_4 memiliki keunggulan sebagai reduktor Cr(VI) karena Fe^{2+} tidak hanya mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) tetapi juga menghasilkan Fe^{3+} yang mendukung koagulasi/flokulasi melalui pembentukan hidroksida besi, sehingga reduksi dan pemisahan dapat dilakukan dalam satu rangkaian proses yang sederhana (Majalis et al., 2022). Sebaliknya, reduktor lain seperti sulfit/metabisulfit atau reduktor organik umumnya dominan pada tahap reduksi dan sering memerlukan tahap koagulasi tambahan untuk pemisahan Cr(III). Dibanding reduktor kuat seperti dithionite yang dapat lebih cepat namun lebih sensitif terhadap kondisi penyimpanan dan degradasi, FeSO_4 relatif mudah diperoleh dan diaplikasikan (Verma & Balomajumder, 2020). Keterbatasan metode FeSO_4 adalah potensi terbentuknya lumpur hidroksida besi dalam jumlah lebih besar yang memerlukan pengelolaan residu, serta penurunan efektivitas akibat oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} sehingga kontrol kondisi operasi seperti pH optimum dan penggunaan larutan segar menjadi penting, dan validasi pada limbah elektrolating nyata tetap diperlukan karena adanya ion pengganggu/kompleksan.

Meskipun penelitian ini menggunakan limbah simulasi, hasilnya dapat dijadikan acuan awal karena merepresentasikan mekanisme utama reduksi Cr(VI) oleh Fe^{2+} dan pemisahan melalui koagulasi/flokulasi. Namun, penerapan pada limbah elektrolating nyata perlu validasi dan optimasi ulang karena matriks industri biasanya lebih kompleks (ion pengganggu/kompleksan, logam lain, padatan tersuspensi, serta fluktuasi pH) yang dapat memengaruhi spesiasi kromium, kebutuhan dosis FeSO_4 , dan karakteristik flok/lumpur. Sehingga, sebelum implementasi lapangan disarankan uji *jar test* pada limbah aktual serta evaluasi Cr(VI)/Cr total dan karakterisasi residu/lumpur untuk memastikan stabilitas proses dan aspek pengelolaan limbah (Zainuddin et al., 2022).

Keterbatasan penelitian ini terutama terkait ruang lingkup pengujian yang masih berbasis limbah simulasi dan skala batch laboratorium, sehingga diperlukan verifikasi lanjutan pada limbah

elektroplating aktual yang memiliki variasi matriks (ion pengganggu/kompleksan, logam lain, dan fluktuasi pH) untuk memantapkan parameter operasi (Prasetyaningrum et al., 2021). Selain itu, aspek operasional seperti optimasi tahapan pengadukan serta evaluasi karakteristik residu/lumpur (mis. Cr total dan stabilitas endapan) belum menjadi fokus utama pada studi ini. Meski demikian, penelitian ini telah menghasilkan kondisi operasi optimum yang jelas dan efisiensi penurunan Cr(VI) yang sangat tinggi, sehingga menyediakan dasar kuat untuk uji skala lebih besar dan penerapan sebagai pra-perlakuan yang cepat dan sederhana.

D. Kesimpulan

Besi(II) sulfat (FeSO_4) terbukti efektif digunakan sebagai agen reduktor sekaligus koagulan dalam proses reduksi dan flokulasi Cr(VI). Kondisi optimum diperoleh pada pH 8, waktu kontak 5 menit, dan dosis FeSO_4 0,1 g untuk larutan Cr(VI) 100 mg/L dengan efisiensi penurunan mencapai 99,89%. Efisiensi penurunan menurun pada konsentrasi Cr(VI) di atas 100 mg/L akibat keterbatasan jumlah Fe^{2+} sebagai agen pereduksi, sehingga diperlukan penambahan dosis koagulan untuk mempertahankan kinerja proses. Aplikasi kondisi optimum pada limbah simulasi elektroplating multilogam menghasilkan konsentrasi akhir Cr(VI) sebesar 0,0921 mg/L dengan efisiensi penurunan 99,9%, yang telah memenuhi baku mutu air limbah elektroplating ($<0,1$ mg/L). Hasil ini menunjukkan bahwa FeSO_4 memiliki selektivitas yang baik terhadap Cr(VI) meskipun terdapat ion logam lain sebagai kompetitor, sehingga metode ini berpotensi diaplikasikan sebagai alternatif pengolahan limbah elektroplating yang sederhana, cepat, dan ekonomis.

Daftar Pustaka

- Alabi, T. T., Adegbola, A. A., Olaniyan, O. S., & Salaudeen, S. (2025). Optimization of coagulation-flocculation process for wastewater treatment using selected coagulants. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 19(2), 166–178. <https://doi.org/10.36108/laujet/5202.91.0271>
- Alfaini, A. D. W., & Sa'diyah, K. (2023). Pengaruh jenis biosorben terhadap kualitas limbah cair domestik pusat perbelanjaan di Dinoyo Malang. Distilat: *Jurnal Teknologi Separasi*, 9(3), 225–239. <https://doi.org/10.33795/distilat.v9i3.3745>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019(1), Artikel 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Andini, A. (2017). Analisa kadar kromium VI [Cr (VI)] air di Kecamatan Tanggulangin, Sidoarjo. *Jurnal SainHealth*, 1(2), 1–4.
- Ardiansyah, R., Elyn, N. R., & Nessi, M. (2018). Biosorpsi ion logam berat Cu(II) dan Cr(VI) menggunakan biosorben kulit kopi terxanthasi. *Jurnal Pendidikan dan Ilmu Kimia*, 2(2), 114–121.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). Air dan air limbah – Bagian 71: Cara uji kromium heksavalen (Cr-VI) dengan spektrofotometri secara fereduksi difenilkarbazida (SNI 6989.71:2009). Das, D., & Nandi, B. K. (2023). Simultaneous removal of coexisting Fe(II) and Cr(VI) from

- wastewater by electrocoagulation (EC) process using different types of connection modes. *Water Conservation Science and Engineering*, 8(1), Artikel 25. <https://doi.org/10.1007/s41101-023-00200-4>
- DesMarais, T. L., & Costa, M. (2019). Mechanisms of chromium-induced toxicity. *Current Opinion in Toxicology*, 14, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2019.05.003>
- Handa, K., & Jindal, R. (2020). Genotoxicity induced by hexavalent chromium leading to eryptosis in *Ctenopharyngodon idellus*. *Chemosphere*, 247, Artikel 125967. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125967>
- Harwan, Jafar, N., Heriansyah, A. F., & Aulia, R. N. (2024). Analisis mineralogi dan geokimia endapan kromit daerah Bulu-Bulu Kecamatan Pujananting Kabupaten Barru Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Geosaintek*, 10(3), 207–214. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v10i3.1578>
- Kapoor, R. T., Bani Mfarrej, M. F., Alam, P., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Accumulation of chromium in plants and its repercussion in animals and humans. *Environmental Pollution*, 301, Artikel 119044. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119044>
- Kementerian ESDM. (2019). *Executive summary pemutakhiran data dan neraca sumber daya mineral dan batubara status 2019*. Kementerian ESDM.
- Liu, P., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., Finrock, Y. Z., & Liu, Y. Y. (2020). Characterization of chromium species and distribution during Krom(VI) removal by biochar using confocal micro-X-ray fluorescence redox mapping and X-ray absorption spectroscopy. *Environment International*, 134, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105286>
- Long, W., Chen, Z., Shi, J., & Yang, S. (2022). Efficient removal of Cr(VI) ions in petrochemical wastewater using Fe₃O₄@*Saccharomyces cerevisiae* magnetic nanocomposite. *Nanomaterials*, 12(18), 3250. <https://doi.org/10.3390/nano12183250>
- Majalis, A. N., Wicaksono, N., Novitasari, Y., Permatasari, N., & Pratiwi, R. (2022). Pengolahan kromium(VI) pada air limbah pertambangan bijih nikel menggunakan besi(II) yang diperoleh dari slag nikel. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 18(3), 177–191. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No3.2022.1314>
- Martini, S., Yuliwati, E., & Kharismadewi, D. (2020). Pembuatan teknologi pengolahan limbah cair industri. *Distilasi*, 5(2), 26–33.
- Montes-Bujaico, S., Taype-Landeo, O., Piscoche-Chinchay, R., Cruz-Ventura, D., Montañez-Artica, W., & Pantoja-Tirado, L. (2025). Optimization of coagulation-flocculation mechanism to reduce chemical oxygen demand in domestic wastewater. *Nature Environment and Pollution Technology*, 24(4), Artikel D1817. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i04.D1817>
- Murwanto, B., Sutopo, A., & Yushananta, B. (2021). Coagulation and filtration methods on tofu wastewater treatment. *Jurnal Aisyah: Jurnal Ilmu Kesehatan*, 6(2), 285–292.

- Nguyen, Q. A., Kim, B., Chung, H. Y., Nguyen, A. Q. K., Kim, J., & Kim, K. (2021). Reductive transformation of hexavalent chromium by ferrous ions in a frozen environment: Mechanism, kinetics, and environmental implications. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, Artikel 111735. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111735>
- Nurhasni, Salimin, Z., & Nurifitriyani, I. (2013). Pengolahan limbah industri elektroplating dengan proses koagulasi flokulasi. *Valensi*, 3(1), 41–47.
- Nurhayati, I., Vigiani, S., & Majid, D. (2020). Penurunan kadar besi dan kromium limbah cair laboratorium teknik lingkungan dengan pengenceran, koagulasi dan adsorpsi. *Ecotrophic*, 14(1), 74–87. <https://doi.org/10.24843/EJES.2020.v14.i01.p07>
- Pemerintah Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Sekretariat Negara.
- Prasetyaningrum, A., Ariyanti, D., Widayat, W., & Jos, B. (2021). Copper and lead ions removal by electrocoagulation: Process performance and implications for energy consumption. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(3), 415–424. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.31665>
- Prasetyo, Y., Abida, I. W., Laksani, M. R. T., & Putri, R. R. (2023). Histopatologi jaringan insang ikan betok (*Anabas testudineus* Bloch, 1792) akibat paparan logam berat kromium (Cr) di Sungai Desa Geluran Kabupaten Sidoarjo. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 3(4), 89–96. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v3i4.17615>
- Prastyo, D., Herawati, T., & Iskandar. (2016). Bioakumulasi logam kromium (Cr) pada insang, hati, dan daging ikan yang tertangkap di hulu Sungai Cimanuk Kabupaten Garut. *Jurnal Kelautan*, 7(2), 1–8.
- Singh, B. J., Chakraborty, A., & Sehgal, R. (2023). A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of Environmental Management*, 348, Artikel 119230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>
- Stylianou, S., Simeonidis, K., Mitrakas, M. *et al.* Reductive precipitation and removal of Cr(VI) from groundwaters by pipe flocculation-microfiltration. *Environ Sci Pollut Res* 25, 12256–12262 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9967-4>
- Sutisna, M. A. (2024). Pencemaran limbah printed circuit board dari kegiatan kelistrikan PLN. *Humans and Chemical Regimes*, 1(1), 15–23. <https://doi.org/10.61511/hcr.v1i1.639>
- Sy, S., Mardiaty, Mawardi, Sofyan, Ardina, & Purnomo, Y. (2016). Adsorpsi ion Cr(VI) menggunakan adsorben dari limbah padat lumpur aktif industri crumb rubber. *Jurnal Litbang Industri*, 6(2), 135–145.
- Verma, B., & Balomajumder, C. (2020). Hexavalent chromium reduction from real electroplating wastewater by chemical precipitation. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 34(1), 67–74. <https://dx.doi.org/10.4314/bcse.v34i1.6>.

- Wang, K.-J., & Wang, P.-S. (2025). Coagulation-flocculation process optimization for industrial wastewater treatment: A multi-objective computational solution. *Journal of Water Process Engineering*, 78, Artikel 108703. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108703>
- Zainuddin, N. A. M., Ibrahim, M. Z., & Abdullah, S. (2022). Reduction of hexavalent chromium to trivalent chromium using sludge from acetylene gas production. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(3), 133–141. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.03.016>
- Zhang, T., Chen, Y., Zhang, Y., Liu, B., Liu, Y., & Zhao, J. (2023). Simultaneous removal of catechol and Cr(VI) from tannery wastewaters through Fe(III)-mediating electron transfer. *Chemical Engineering Journal*, 472, Artikel 145085. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145085>