

Pemanfaatan Scrap Besi untuk Reduksi Krom Heksavalen Limbah Cair Industri Pelapisan Logam

¹⁾Sunardi*, ²⁾Argoto Mahayana, ³⁾Sumardiyono, ⁴⁾Lucia Sincu Gunawan, ⁵⁾Nur Hidayati, ⁶⁾Soebiyanto, ⁷⁾Mahardira Dewantara, ⁸⁾Afif Afghohani

¹⁾Analisis Kimia, Universitas Setia Budi, Surakarta, Indonesia

²⁾Teknik Kimia, Universitas Setia Budi, Surakarta, Indonesia

^{4,5,6)}Analisis Kesehatan, Universitas Setia Budi, Surakarta, Indonesia

⁷⁾Teknologi Rekayasa Elektromedis, Universitas Muhammadiyah PKU, Surakarta, Indonesia

⁸⁾Pendidikan Matematika, Universitas Veteran Bangun Raharja, Sukoharjo, Indonesia

Email Corresponding: sunardi@setiabudi.ac.id*

INFORMASI ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci:

Scrap besi
Kromium heksavalen
Reduksi
Limbah cair
Industri pelapisan logam

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan untuk menerapkan hasil penelitian pemanfaatan limbah scrap besi sebagai agen pereduksi kromium heksavalen (Cr(VI)) dalam limbah cair industri pelapisan logam skala kecil. Lokasi kegiatan berada di industri pelapisan logam Gemilang Chrome, Jl. Raya Palur Km. 7,5 Solo, yang belum memiliki sistem pengolahan limbah cair berbahaya secara memadai. Metode yang digunakan meliputi survei lapangan, wawancara dengan pemilik dan operator industri, pengambilan dan analisis sampel limbah, pelatihan teknologi tepat guna, serta implementasi langsung teknologi reduksi Cr(VI) menggunakan scrap besi dalam skala sederhana. Hasil kegiatan menunjukkan bahwa scrap besi mampu mereduksi kadar Cr(VI) hingga 87,5% dalam kondisi optimum pH 3 dan waktu kontak 90 menit. Selain efisiensi teknis, terjadi peningkatan pengetahuan dan keterampilan mitra dalam pengelolaan limbah berbahaya secara mandiri dan murah. Temuan ini menunjukkan bahwa scrap besi tidak hanya berfungsi sebagai agen remediasi yang efektif, tetapi juga sebagai solusi aplikatif berbasis prinsip ekonomi sirkular yang relevan untuk diterapkan pada industri pelapisan logam berskala UMKM. Kegiatan ini sekaligus membuktikan bahwa hasil riset laboratorium dapat diadaptasikan dalam konteks pengabdian masyarakat yang nyata, berkelanjutan, dan berdaya guna.

ABSTRACT

Keywords:

scrap iron
hexavalent chromium
reduction
liquid waste
metal coating industry

This community service activity aims to apply the results of research on the use of scrap iron waste as a reducing agent for hexavalent chromium (Cr(VI)) in liquid waste from small-scale metal coating industries. The activity is located at Gemilang Chrome Metal Plating Industry, Jl. Raya Palur Km. 7.5, Solo, which currently lacks an adequate hazardous liquid waste treatment system. The methods employed include field surveys, interviews with the industry owners and operators, sample collection and analysis of wastewater, training in appropriate technology, and the direct implementation of Cr(VI) reduction technology using scrap iron on a small scale. The results of the activity indicate that scrap iron can reduce Cr(VI) levels by up to 87.5% under optimal conditions of pH 3 and a contact time of 90 minutes. In addition to technical efficiency, there was an increase in partners' knowledge and skills in managing hazardous waste independently and cost-effectively. These findings indicate that scrap iron not only functions as an effective remediation agent but also as an applicable solution based on circular economy principles relevant for implementation in small and medium-sized metal plating industries. This activity also demonstrates that laboratory research results can be adapted in the context of real, sustainable, and useful community service.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



I. PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industri pelapisan logam telah menghasilkan limbah cair yang mengandung berbagai logam berat, salah satunya adalah kromium dalam bentuk heksavalen (Cr(VI)) (Itankar & Patil,

2022; Kerur et al., 2021; Ramli et al., 2023). Cr(VI) dikenal bersifat toksik, karsinogenik, dan mutagenik, yang berdampak serius terhadap kesehatan manusia dan lingkungan perairan apabila tidak ditangani secara tepat (Mohanty et al., 2023; Sharma et al., 2022; Singh et al., 2023). Oleh karena itu, pengelolaan limbah cair yang mengandung Cr(VI) menjadi isu krusial dalam mendukung pembangunan industri yang berkelanjutan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi kadar Cr(VI) dalam limbah cair, termasuk teknik presipitasi kimia (Guo et al., 2021; Husain et al., 2025; Kerur et al., 2021; Staszak et al., 2022; D. Wang et al., 2021), pertukaran ion (Kocaoba et al., 2022; Thiripelu et al., 2024), osmosis balik (Engstler et al., 2022; Karimi et al., 2024), dan adsorpsi (Gupta et al., 2010; Hamadeen et al., 2022; Li et al., 2021; Setyawan et al., 2024; Tie et al., 2023). Namun, sebagian besar metode tersebut memiliki keterbatasan dari segi biaya operasional yang tinggi, efisiensi yang rendah pada konsentrasi kecil, serta menghasilkan residu baru yang memerlukan penanganan lebih lanjut (Barakat, 2011). Oleh karena itu, pendekatan yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan diperlukan untuk mengatasi persoalan ini.

Kajian-kajian sebelumnya menunjukkan bahwa logam besi (Fe), terutama dalam bentuk besi elemental (Fe^0), telah digunakan secara luas sebagai agen pereduksi untuk Cr(VI) menjadi bentuk Cr(III) yang kurang toksik (Shi et al., 2025; L. Wang et al., 2025; Xi et al., 2025; Xiong et al., 2025; Zhao et al., 2025). Dalam dekade terakhir, pendekatan berbasis zero-valent iron (ZVI) menjadi sorotan karena kemampuannya dalam mendekomposisi Cr(VI) dengan efisiensi tinggi (Namakka et al., 2024; Wu et al., 2024; Yang et al., 2024). Namun, penggunaan ZVI murni cenderung mahal dan tidak ramah lingkungan jika diproduksi dalam skala besar (Fang et al., 2024; Plessl et al., 2023; P. Wang et al., 2023; Zhang et al., 2022). Untuk mengatasi hal tersebut, berbagai upaya telah dilakukan dalam menggunakan sumber Fe alternatif, seperti besi bekas atau limbah logam industri (scrap besi), sebagai material fungsional dalam proses remediasi (Fu et al., 2016; Fu & Wang, 2011; Matei et al., 2022; Pradhan & Nambi, 2025; Wei et al., 2025).

Studi oleh Fu et al. (2016) menunjukkan bahwa scrap besi dapat digunakan sebagai material pereduksi untuk Cr(VI), tetapi efisiensinya masih bergantung pada morfologi, luas permukaan, dan kondisi reaksi seperti pH dan waktu kontak (Fu et al., 2016). Studi lain oleh Das et al. (2018) juga memperkuat bahwa reaktivitas besi bekas dapat ditingkatkan dengan perlakuan awal atau aktivasi permukaan, yang membuka peluang pengembangan teknologi berbasis limbah industri logam sebagai agen remediasi (Das et al., 2018). Namun, hingga kini, pemanfaatan scrap besi bengkel bubut sebagai agen pereduksi Cr(VI) dalam skala laboratorium maupun semi-aplikatif masih belum banyak dieksplorasi, terutama di Indonesia.

Berdasarkan kajian literatur tersebut, kebaruan ilmiah dari kajian ini terletak pada pemanfaatan limbah scrap besi dari bengkel bubut sebagai agen pereduksi Cr(VI) dalam limbah cair industri pelapisan logam secara langsung, tanpa proses aktivasi kimia atau fisik yang kompleks. Pendekatan ini tidak hanya bersifat *low-cost* dan *waste-to-resource*, tetapi juga memberikan nilai tambah dalam pengelolaan limbah logam besi yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Di sisi lain, pendekatan ini juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengabdian kepada masyarakat melalui pemanfaatan limbah lokal sebagai solusi lingkungan.

Permasalahan utama yang dikaji dalam pengabdian ini adalah efektivitas scrap besi dalam mereduksi konsentrasi Cr(VI) dari limbah cair industri pelapisan logam serta pengaruh parameter proses seperti pH, waktu reaksi, dan rasio massa terhadap efisiensi reduksi. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa scrap besi dapat secara signifikan mereduksi konsentrasi Cr(VI) dalam kondisi optimum reaksi tertentu.

Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan scrap besi bengkel bubut sebagai agen pereduksi Cr(VI) dari limbah cair industri pelapisan logam, serta menentukan kondisi operasional yang optimum untuk mencapai efisiensi reduksi yang tinggi secara berkelanjutan dan aplikatif dalam konteks pengabdian masyarakat.

II. MASALAH

Industri pelapisan logam Gemilang Chrome yang berlokasi di Jl. Raya Palur Km. 7,5 termasuk di kawasan industri kecil di Palur Kabupaten Karanganyar merupakan salah satu sektor usaha yang berkembang pesat dalam mendukung kebutuhan komponen logam untuk berbagai sektor, seperti otomotif, elektronik, dan peralatan rumah tangga. Proses pelapisan logam yang umum dilakukan di lokasi ini antara lain pelapisan krom (*chromium plating*), nikel, dan seng, yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi serta estetika produk logam. Namun, di balik manfaatnya, proses pelapisan logam ini menghasilkan limbah cair

yang mengandung logam berat berbahaya, terutama kromium heksavalen (Cr(VI)), yang menjadi sumber pencemaran utama.

Hasil observasi dan wawancara dengan pelaku industri di lokasi pengabdian menunjukkan bahwa pengelolaan limbah cair yang mengandung Cr(VI) belum dilakukan pengolahan. Limbah cair langsung dibuang ke saluran umum atau ke badan air tanpa melalui proses pengolahan yang memadai. Beberapa industri kecil hanya menggunakan metode pengendapan sederhana tanpa pemantauan kadar Cr(VI) pasca-olah. Akibatnya, konsentrasi Cr(VI) dalam limbah cair yang dibuang masih sangat tinggi dan melebihi baku mutu limbah industri menurut Peraturan Menteri Lingkungan hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor: P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik sebesar 0,5 ppm (Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2016).

Kondisi ini menimbulkan dampak lingkungan yang serius, seperti pencemaran tanah dan air permukaan, serta menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat sekitar. Paparan jangka panjang terhadap Cr(VI) diketahui dapat menyebabkan iritasi kulit, gangguan pernapasan, hingga kanker, terutama jika terakumulasi dalam air sumur atau bahan pangan yang dikonsumsi penduduk setempat (Georgaki et al., 2023; Georgaki & Charalambous, 2023; Sharma et al., 2022). Di sisi lain, para pelaku industri kecil seringkali tidak memiliki sumber daya atau teknologi yang memadai untuk membangun instalasi pengolahan limbah yang efektif dan berbiaya tinggi.

Masalah semakin kompleks karena wilayah tersebut juga menghasilkan limbah padat logam seperti scrap besi dari aktivitas bengkel bubut, yang hingga kini belum dimanfaatkan secara optimal dan justru menumpuk sebagai limbah. Padahal, scrap besi tersebut berpotensi besar dimanfaatkan sebagai bahan fungsional untuk reduksi Cr(VI) secara in-situ melalui reaksi redoks, yang tidak hanya mengurangi limbah cair berbahaya, tetapi juga menyelesaikan persoalan limbah padat logam.

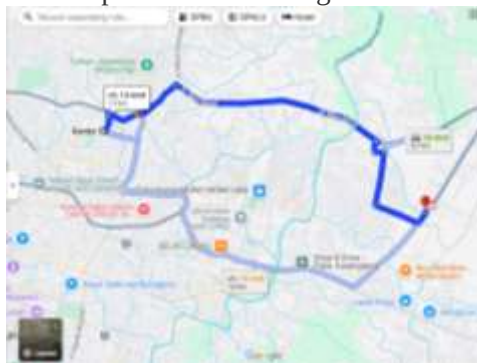
Dengan demikian, masalah utama yang dihadapi di lokasi pengabdian masyarakat adalah:

1. Tingginya kandungan Cr(VI) dalam limbah cair industri pelapisan logam yang tidak ditangani secara efektif.
2. Ketidaksiapan industri kecil dalam menerapkan teknologi pengolahan limbah yang ramah lingkungan karena keterbatasan biaya dan pengetahuan.
3. Limbah padat berupa scrap besi yang belum dimanfaatkan, padahal dapat dijadikan solusi lokal berbasis waste-to-resource.
4. Ketiadaan pendekatan sederhana, murah, dan dapat diadopsi masyarakat untuk mengurangi risiko lingkungan akibat limbah logam berat.

Masalah-masalah ini menjadi dasar kuat dilakukannya program pengabdian masyarakat berbasis penelitian terapan, yang tidak hanya menyasar penyuluhan atau edukasi, tetapi juga implementasi langsung teknologi sederhana yang sesuai dengan karakteristik dan sumber daya lokal.

III. METODE

Lokasi pengabdian adalah Gemilang Chrome yang terletak di Jl. Raya Palur Km. 7,5 yang berjarak 7,5 Km dari Universitas Setia yang bisa ditempuh 15 menit sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi Gemilang Chrome

Pengabdian kepada masyarakat ini dilaksanakan di industri pelapisan logam Gemilang Chrome yang berlokasi di Jl. Raya Palur Km. 7,5 Solo, dengan tujuan utama untuk menerapkan hasil penelitian

pemanfaatan scrap besi sebagai agen reduktor kromium heksavalen (Cr(VI)) dalam limbah cair industri elektroplating (Sunardi, 2024). Metode yang digunakan dalam kegiatan ini adalah metode transfer teknologi berbasis partisipatif, yang dikombinasikan dengan pendekatan edukatif-aplikatif untuk meningkatkan kapasitas mitra industri dalam pengelolaan limbah berbahaya.

Tahapan pelaksanaan pengabdian kepada masyarakat adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi dan Survei Awal

Kegiatan diawali dengan survei lapangan dan wawancara mendalam dengan pihak pengelola industri. Survei dilakukan untuk mengetahui kondisi eksisting proses pelapisan logam, jenis bahan kimia yang digunakan, serta sistem pembuangan limbah cair. Wawancara dilakukan terhadap pemilik industri, 2 orang operator proses pelapisan, serta 3 orang warga sekitar sebagai representasi masyarakat terdampak lingkungan, sehingga jumlah total responden adalah 6 orang.

2. Pengambilan dan Analisis Sampel Limbah

Tim pengabdian melakukan pengambilan sampel limbah cair dari outlet proses pelapisan krom untuk dianalisis kadar awal Cr(VI)-nya. Analisis dilakukan di laboratorium menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis dengan reagen 1,5-difenilkarbazid pada panjang gelombang 540 nm (B.K et al., 2025; Dikobe et al., 2024).

3. Persiapan dan Aplikasi Teknologi

Bahan scrap besi diperoleh dari bengkel bubut lokal di sekitar Kota Solo, dipotong kecil dan dicuci sebelum digunakan sebagai agen reduktor. Dalam tahap ini, dilakukan:

- Uji coba skala laboratorium di lokasi mitra menggunakan reaktor batch sederhana.
- Pengukuran efisiensi reduksi Cr(VI) pada berbagai variasi pH, waktu kontak, dan massa scrap besi.
- Sosialisasi hasil uji kepada mitra industri.

4. Pelatihan dan Pendampingan

Setelah diperoleh kondisi optimum dari hasil uji laboratorium, dilakukan pelatihan kepada mitra industri mengenai:

- Bahaya limbah Cr(VI) terhadap lingkungan dan kesehatan.
- Prinsip kerja reaksi reduksi Cr(VI) menggunakan besi elemental.
- Cara penggunaan scrap besi dalam skala proses secara sederhana dan efisien.
- Pelatihan ini diikuti oleh pemilik dan dua operator utama, serta dihadiri perwakilan dari Kelurahan dan RW setempat sebagai bentuk keterlibatan masyarakat.

5. Evaluasi dan Monitoring

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil uji kadar Cr(VI) sebelum dan sesudah proses reduksi, serta melalui kuisioner responden untuk mengukur tingkat pemahaman dan kesiapan penerapan teknologi oleh mitra. Selain itu, tim melakukan monitoring selama dua minggu setelah penerapan teknologi secara langsung untuk melihat keberlanjutan praktik oleh mitra.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini berhasil dilaksanakan selama periode dua bulan dengan tahapan yang meliputi: survei awal, pengambilan sampel limbah, pengujian laboratorium, pelatihan teknologi tepat guna, implementasi di lapangan, serta evaluasi pascapelaksanaan. Seluruh tahapan tersebut dirancang untuk mencapai tujuan utama, yaitu menerapkan teknologi sederhana dan murah dalam menurunkan kadar kromium heksavalen (Cr(VI)) menggunakan limbah scrap besi, yang mudah diakses oleh industri pelapisan logam skala kecil.

1. Pencapaian Tujuan dan Indikator Keberhasilan

Tujuan utama kegiatan, yaitu mengurangi kadar Cr(VI) dalam limbah cair industri pelapisan logam secara efektif dan ekonomis menggunakan scrap besi bengkel bubut, dapat dikatakan tercapai secara optimal berdasarkan beberapa indikator:

- Indikator teknis: Terjadi penurunan kadar Cr(VI) sebesar 87,5% dari konsentrasi awal 3,2 mg/L menjadi 0,4 mg/L setelah perlakuan menggunakan 25 gram scrap besi dalam kondisi optimum pH 3 dan waktu kontak 90 menit. Nilai ini mendekati batas maksimum baku mutu limbah cair menurut regulasi nasional (0,1 mg/L), dan menunjukkan bahwa teknologi ini cukup menjanjikan untuk tahap awal.

- b. Indikator edukatif: Terjadi peningkatan pemahaman mitra (pemilik dan operator) tentang bahaya Cr(VI) serta metode pengolahannya, yang diukur melalui kuisioner sebelum dan sesudah pelatihan. Skor pemahaman meningkat dari rata-rata 55% (pra-pelatihan) menjadi 88% (pasca-pelatihan).
- c. Indikator partisipasi: Mitra bersedia menerapkan teknologi ini secara mandiri dalam skala kecil untuk batch limbah harian, yang ditunjukkan melalui keterlibatan aktif selama proses implementasi dan penyediaan area khusus untuk reaktor sederhana.

2. Keunggulan dan Kelemahan Luaran

Luaran utama dari kegiatan ini adalah penerapan teknologi tepat guna berbasis *waste-to-resource* yang menggunakan limbah scrap besi dari bengkel bubut sebagai agen pereduksi. Keunggulan dari pendekatan ini antara lain:

- a. Murah dan mudah diperoleh: Scrap besi banyak tersedia di sekitar lokasi, sehingga biaya operasional pengolahan limbah bisa ditekan hingga lebih dari 70% dibandingkan metode konvensional.
- b. Ramah lingkungan dan sirkular: Teknologi ini mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah logam padat untuk mengolah limbah cair berbahaya.
- c. Aplikatif untuk UMKM: Teknologi ini tidak memerlukan peralatan canggih dan dapat diterapkan dengan alat sederhana.

Namun, terdapat beberapa kelemahan luaran jika dilihat dari konteks penerapan jangka panjang di lokasi mitra, antara lain:

- a. Efisiensi reduksi tergantung kondisi pH: Mitra perlu menambahkan asam (seperti H_2SO_4) untuk mencapai pH optimum (pH 3), yang mungkin menimbulkan tantangan tambahan dari sisi keamanan dan biaya bahan kimia.
- b. Keterbatasan ruang dan waktu: Skema reaktor sederhana masih bekerja secara batch, sehingga belum efektif untuk volume limbah yang besar dan kontinu tanpa modifikasi lebih lanjut.

3. Tingkat Kesulitan dan Peluang Pengembangan

Dari sisi pelaksanaan, tingkat kesulitan teknis tergolong sedang karena teknologi yang digunakan cukup sederhana, tetapi tantangan muncul dari:

- a. Kurangnya kebiasaan operator industri dalam menggunakan prosedur pengolahan limbah secara sistematis.
- b. Kebutuhan pembiasaan dan monitoring dalam mengatur waktu kontak, massa besi, dan pemeliharaan reaktor sederhana.

Namun demikian, kegiatan ini membuka peluang besar untuk pengembangan lebih lanjut, di antaranya:

- a. Pengembangan reaktor semi-kontinu atau skala pilot untuk meningkatkan kapasitas pengolahan.
- b. Integrasi sistem otomatisasi sederhana dengan kontrol pH dan waktu reaksi menggunakan sensor murah berbasis mikrokontroler.
- c. Kolaborasi lanjutan dengan bengkel bubut atau pengelola limbah padat logam untuk menjamin ketersediaan bahan baku scrap berkualitas.

Selain itu, terdapat peluang untuk menjadikan model ini sebagai contoh penerapan teknologi tepat guna bagi industri pelapisan logam lain di wilayah Solo Raya, sekaligus memperkuat pendekatan ekonomi sirkular di sektor industri kecil.

V. KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini berhasil membuktikan bahwa limbah scrap besi dari bengkel bubut dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai agen pereduksi untuk menurunkan kadar kromium heksavalen (Cr(VI)) dalam limbah cair industri pelapisan logam skala kecil. Temuan ini mengkonfirmasi hipotesis bahwa scrap besi memiliki reaktivitas cukup untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III), terutama pada kondisi pH asam dan waktu kontak yang terkontrol.

Secara praktis, penerapan teknologi ini di lingkungan industri Gemilang Chrome menunjukkan bahwa pendekatan *low-cost*, *low-tech* ini tidak hanya mampu meningkatkan kualitas limbah cair secara signifikan, tetapi juga dapat diterima dan dioperasikan langsung oleh pelaku industri. Hal ini menjadi bukti bahwa hasil penelitian laboratorium dapat diadaptasikan dalam konteks pengabdian masyarakat yang nyata, dengan tetap mempertimbangkan aspek keberlanjutan, keterjangkauan, dan kemudahan replikasi. Dengan demikian, kegiatan ini tidak hanya menghasilkan solusi teknis bagi pencemaran logam berat, tetapi juga berkontribusi

pada peningkatan kapasitas lokal dalam pengelolaan limbah berbahaya berbasis teknologi tepat guna dan prinsip ekonomi sirkular.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Gemilang Chrome. Ucapan terima kasih sampaikan kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan kegiatan Pengabdian.

DAFTAR PUSTAKA

- B.K, V., Bagchi, S., & T.R, S. (2025). Chromium Detection in Water Using Optical Methods: A Study of Reagent and Reagentless Approaches. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1080/10408347.2024.2419896>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:BATC20;WGROU:ST RING:PUBLICATION
- Das, P., Mondal, G. C., Singh, S., Singh, A. K., Prasad, B., & Singh, K. K. (2018). Effluent Treatment Technologies in the Iron and Steel Industry - A State of the Art Review. *Water Environment Research*, 90(5), 395–408. <https://doi.org/10.2175/106143017X15131012152951>
- Dikobe, J., Melato, F. A., Adlem, C. J. L., & Netshiongolwe, K. (2024). Determination of chromium species in water using diphenylcarbazide with a sequential spectrophotometric discrete robotic analyser. *Heliyon*, 10(14), 2405–8440. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34670>
- Engstler, R., Reipert, J., Karimi, S., Vukušić, J. L., Heinzler, F., Davies, P., Ulbricht, M., & Barbe, S. (2022). A Reverse Osmosis Process to Recover and Recycle Trivalent Chromium from Electroplating Wastewater. *Membranes* 2022, Vol. 12, Page 853, 12(9), 853. <https://doi.org/10.3390/MEMBRANES12090853>
- Fang, Y., Ni, X., Xiao, Q., Huang, S., & López-Valdivieso, A. (2024). Iron-Based Materials Synthesized by Mechanical Ball Milling for Environmental Contaminants Removal: Progress and Prospects. *International Journal of Environmental Research* 2024 19:1, 19(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/S41742-024-00671-W>
- Fu, F., Han, W., Cheng, Z., & Tang, B. (2016). Removal of hexavalent chromium from wastewater by acid-washed zero-valent aluminum. *Desalination and Water Treatment*, 57(12), 5592–5600. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1006259>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2010.11.011>
- Georgaki, M. N., & Charalambous, M. (2023). Toxic chromium in water and the effects on the human body: a systematic review. *Journal of Water and Health*, 21(2), 205–223. <https://doi.org/10.2166/WH.2022.214>
- Georgaki, M. N., Charalambous, M., Kazakis, N., Talias, M. A., Georgakis, C., Papamitsou, T., & Mytigiaki, C. (2023). Chromium in Water and Carcinogenic Human Health Risk. *Environments* 2023, Vol. 10, Page 33, 10(2), 33. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS10020033>
- Guo, Y., Li, H. Y., Cheng, J., Shen, S., Diao, J., & Xie, B. (2021). Highly efficient separation and recovery of Si, V, and Cr from V-Cr-bearing reducing slag. *Separation and Purification Technology*, 263, 118396. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2021.118396>
- Gupta, V. K., Rastogi, A., & Nayak, A. (2010). Adsorption studies on the removal of hexavalent chromium from aqueous solution using a low cost fertilizer industry waste material. *J. Colloid Interface Sci.*, 342(1), 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.09.065>
- Hamadeen, H. M., Elkhatib, E. A., & Moharem, M. L. (2022). Optimization and mechanisms of rapid adsorptive removal of chromium (VI) from wastewater using industrial waste derived nanoparticles. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/S41598-022-18494-0>;SUBJMETA=169,172,638,639,704,896;KWRD=ENVIRONMENTAL+CHEMISTRY,POLLUTION+REME DIATION
- Husain, A., Ayub, S., Khan, A. H., Alam, S. S., & Hasan, M. A. (2025). Pilot scale recovery, and removal of chromium from tannery wastewater by chemical precipitation: Life cycle assessment and cost analysis. *Journal of Environmental Management*, 391, 126502. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.126502>
- Itankar, N., & Patil, Y. (2022). Assessing Physicochemical Technologies for Removing Hexavalent Chromium from Contaminated Waters—an Overview and Future Research Directions. *Water, Air, & Soil Pollution* 2022 233:9, 233(9), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S11270-022-05745-Z>
- Karimi, S., Engstler, R., Hosseinipour, E., Wagner, M., Heinzler, F., Piepenbrink, M., Barbe, S., & Davies, P. A. (2024). High-pressure batch reverse osmosis (RO) for zero liquid discharge (ZLD) in a Cr(III) electroplating process. *Desalination*, 580, 117479. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2024.117479>
- Kerur, S. S., Bandekar, S., Hanagadakar, M. S., Nandi, S. S., Ratnamala, G. M., & Hegde, P. G. (2021). Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1112–1121. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.492>
- Kocaoba, S., Cetin, G., & Akcin, G. (2022). Chromium removal from tannery wastewaters with a strong cation

- exchange resin and species analysis of chromium by MINEQL+. *Scientific Reports*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/S41598-022-14423-3>;SUBJMETA=172,4111,638,639,704;KWRD=CHEMISTRY,ENVIRONMENTAL+SCIENCES,NATURAL+HAZARDS
- Li, L., Cao, G., & Zhu, R. (2021). Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by a litchi shell-based adsorbent. *Environmental Research*, 196, 110356. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2020.110356>
- Matei, E., Predescu, A. M., Șăulean, A. A., Râpă, M., Sohaciu, M. G., Coman, G., Berbecaru, A. C., Predescu, C., Vâju, D., & Vlad, G. (2022). Ferrous Industrial Wastes—Valuable Resources for Water and Wastewater Decontamination. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, Vol. 19, Page 13951, 19(21), 13951. <https://doi.org/10.3390/IJERPH192113951>
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, I. (2016). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor : P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 10–27.
- Mohanty, S., Benya, A., Hota, S., Kumar, M. S., & Singh, S. (2023). Eco-toxicity of hexavalent chromium and its adverse impact on environment and human health in Sukinda Valley of India: A review on pollution and prevention strategies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 46–54. <https://doi.org/10.1016/J.ENCECO.2023.01.002>
- Namakka, M., Rahman, M. R., Bin Mohamad Said, K. A., & Muhammad, A. (2024). Insights into micro-and nano-zero valent iron materials: synthesis methods and multifaceted applications. *RSC Advances*, 14(41), 30411–30439. <https://doi.org/10.1039/D4RA03507K>
- Plessl, K., Russ, A., & Vollprecht, D. (2023). Application and development of zero-valent iron (ZVI) for groundwater and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6913–6928. <https://doi.org/10.1007/S13762-022-04536-7/METRICS>
- Pradhan, P., & Nambi, I. M. (2025). Sustainable remediation method for hexavalent chromium contaminated site. *Process Safety and Environmental Protection*, 199, 107268. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2025.107268>
- Ramli, N. N., Kurniawan, S. B., Ighalo, J. O., Mohd Said, N. S., Marsidi, N., Buhari, J., Ramli Shah, R. A., Zulkifli, M., Alias, J., Daud, N. M., Ahmad, J., Othman, A. R., Sheikh Abdullah, S. R., & Abu Hasan, H. (2023). A review of the treatment technologies for hexavalent chromium contaminated water. *BioMetals* 2023 36:6, 36(6), 1189–1219. <https://doi.org/10.1007/S10534-023-00512-X>
- Setyawan, F., Dian Indrawati Sawali, F., Azhar Afandy, M., & Mustikaningrum, M. (2024). Cr (VI) Removal from Aqueous Solution by Coagulation-Adsorption Integrated System. *J. Chem. Sci*, 13(1). <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- Sharma, P., Singh, S. P., Parakh, S. K., & Tong, Y. W. (2022). Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction. *Bioengineered*, 13(3), 4923–4938. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273>
- Shi, D., Han, J., Mi, S., Chen, Y., Ma, Y., Li, Y., Zuo, J., & Zhu, G. (2025). Creation of ultra-fine sulfide-modified nano zero-valent iron onto NH₂-SiO₂ surface for enhanced removal performance of Ni(II). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3), 116665. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2025.116665>
- Singh, V., Abhishek, K., Nand Rai, S., Singh, S. K., Vamanu, E., & Kumar, A. (2023). Source of Cr(VI) in the aquatic ecosystem, its genotoxic effects and microbial removal from contaminated water. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2267079>;WEBSITE:WEBSITE:TFOPB;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION
- Staszak, K., Kruszelnicka, I., Ginter-Kramarczyk, D., Góra, W., Baraniak, M., Lota, G., & Regel-Rosocka, M. (2022). Advances in the Removal of Cr(III) from Spent Industrial Effluents—A Review. *Materials* 2023, Vol. 16, Page 378, 16(1), 378. <https://doi.org/10.3390/MA16010378>
- Sunardi. (2024). Treating Waste with Waste : Utilization of Iron Powder for the Reduction of Chromium (Cr⁶⁺) in Metal Plating Industry Liquid Waste. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(3). <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/301>
- Thiripelu, P., Manjunathan, J., Revathi, M., & Ramasamy, P. (2024). Removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater by ion-exchange in presence of Ni(II) and Zn(II) ions. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104815. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.104815>
- Tie, J., Li, W., Liu, H., Huang, K., Mi, X., Wei, M., & Hou, L. (2023). Efficient adsorption and reduction of Cr(VI) by a novel polyaniline modified magnetic iron-based waterworks sludge from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 451, 137673. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.137673>
- Wang, D., Li, G., Qin, S., Tao, W., Gong, S., & Wang, J. (2021). Remediation of Cr(VI)-contaminated soil using combined chemical leaching and reduction techniques based on hexavalent chromium speciation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111734. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.111734>
- Wang, L., Song, C., Jiang, X., Li, T., & Wang, H. (2025). Mechanochemical synthesis of redox-active Fe-based

- nanocomposites for efficient Cr(VI) remediation in water and soil. *Separation and Purification Technology*, 377, 134212. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2025.134212>
- Wang, P., Hu, J., Liu, T., Han, G., Ma, W. min, & Li, J. (2023). New insights into ball-milled zero-valent iron composites for pollution remediation: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135513. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.135513>
- Wei, R., Xia, J., Wang, R., & Long, H. (2025). A novel approach to collaborative treatment of chromium-containing wastewater via a rotary hearth furnace: Direct reduction of hexavalent chromium to metallic chromium. *Journal of Water Process Engineering*, 71, 107366. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2025.107366>
- Wu, Q., Sun, Y., Luo, Z., Li, X., Wen, Y., Shi, Y., Wu, X., Huang, X., Zhu, Y., & Huang, C. (2024). Application and development of zero-valent iron (ZVI)-based materials for environmental remediation: A scientometric and visualization analysis. *Environmental Research*, 241, 117659. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.117659>
- Xi, Y., Peng, Z., Zhang, Z., Su, Z., Huang, Y., Li, X., & Yuan, X. (2025). Enhanced Cr(VI) removal by nanoscale zerovalent iron through biogenic sulfidation: Comparison against corresponding chemical sulfidation. *Cleaner Chemical Engineering*, 11, 100184. <https://doi.org/10.1016/J.CLCE.2025.100184>
- Xiong, L., Hu, H., Liu, M., & Li, X. (2025). Fly ash-doped biochar-supported nZVI composite for Cr(VI) removal: Synthesis, performance, and mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 724, 137521. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2025.137521>
- Yang, M., Zhang, X., & Sun, Y. (2024). Remediation of Cr(VI) Polluted Groundwater Using Zero-Valent Iron Composites: Preparation, Modification, Mechanisms, and Environmental Implications. *Molecules* 2024, Vol. 29, Page 5697, 29(23), 5697. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29235697>
- Zhang, Y. fei, Zhang, C. hui, Xu, J. hui, Li, L., Li, D., Wu, Q., & Ma, L. ming. (2022). Strategies to enhance the reactivity of zero-valent iron for environmental remediation: A review. *Journal of Environmental Management*, 317, 115381. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115381>
- Zhao, C., Zhang, M., Zhang, Y., Jiang, L., Tao, J., & Wen, J. (2025). Fabrication of iron incorporated engineering architectures with exceptional antioxidant capacity and remarkable stability aerogels for synergistic chemical reduction and adsorptive removal of Cr(VI) from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 373, 133584. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2025.133584>