

Efisiensi Pengolahan Cr(VI) dengan *Resin Immobilized Photocatalyst Technology (RIPT)* Katalis ZnO

Aurelia Asilah Zahrah, Yayok Suryo Purnomo*, Restu Hikmah Ayu Murti

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Negeri Veteran Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: yayoksp.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 22 November 2024

Disetujui: 02 Desember 2024

Abstract

Waste water from the nickel mining process has the potential to contaminate the environment due to the presence of hazardous metals such as chromium (Cr) in the form of Cr(VI) and Cr(III), iron (Fe), nickel (Ni) and other heavy metals. These substances are of great concern because of their toxicity, which can have adverse effects on ecosystems and human health. This study was conducted to investigate the effects of UV-C lamp light intensity, contact time and RIPT-ZnO weight on the removal of hexavalent chromium (Cr(VI)) from nickel wastewater. The method used in this research involved immobilisation of photocatalysts on resin with RIPT concentrations of 5g, 10g and 15g and variations in UV-C lamp light intensity of 8W, 18W and direct sunlight. The contact times tested were 0 minutes, 30 minutes, 60 minutes, 120 minutes and 180 minutes, with the focus of the analysis on the Cr(VI) concentration. The results showed that increasing RIPT dosage resulted in higher Cr(VI) removal percentages. The highest Cr(VI) removal was achieved with a 15 gram RIPT dosage, especially when ZnO was used. The optimum contact time for maximum Cr(VI) removal was 180 minutes, indicating that the longer the wastewater is exposed to RIPT, the higher the removal rate. The study found that the use of ZnO in the RIPT technology achieved the highest Cr(VI) removal efficiency, reaching 96%.

Keywords: *Cr(VI), photocatalyst, resin immobilized photocatalyst, nickel mining wastewater, ZnO*

Abstrak

Limbah cair dari proses pertambangan nikel berpotensi mencemari lingkungan karena mengandung logam berbahaya seperti kromium (Cr) dalam bentuk Cr(VI) dan Cr(III), besi (Fe), nikel (Ni), dan logam berat lainnya. Kandungan zat-zat ini menjadi perhatian utama karena sifatnya yang toksik dan dapat berdampak negatif pada ekosistem serta kesehatan manusia. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh intensitas cahaya lampu UV-C, dan waktu kontak, dan berat RIPT-ZnO terhadap penyisihan kromium heksavalen atau Cr(VI) dari limbah cair nikel. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah proses imobilisasi fotokatalis pada resin dengan variabel konsentrasi RIPT 5gr, 10gr, dan 15gr, serta variasi intensitas cahaya lampu UV-C 8W, 18W, dan cahaya matahari langsung. Waktu kontak yang diuji adalah 0 menit, 30 menit, 60 menit, 120 menit, dan 180 menit, dengan parameter yang dianalisis berfokus pada kadar Cr(VI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan dosis RIPT menghasilkan persentase penyisihan Cr(VI) yang lebih tinggi. Penyisihan Cr(VI) tertinggi diperoleh dengan dosis RIPT sebesar 15 gram, khususnya saat menggunakan ZnO. Waktu kontak optimal untuk penyisihan maksimum Cr(VI) adalah 180 menit, yang mengindikasikan bahwa semakin lama paparan limbah terhadap RIPT, semakin tinggi pula tingkat penyisihannya. Penelitian ini menemukan bahwa penggunaan ZnO dalam teknologi RIPT mencapai efisiensi penyisihan Cr(VI) tertinggi, yaitu 96%.

Kata Kunci: *Cr(VI), fotokatalis, resin immobilized photocatalyst, air limbah pertambangan, ZnO*

1. Pendahuluan

Limbah cair dari proses pertambangan nikel memiliki potensi mencemari lingkungan, karena dapat mengandung logam berbahaya seperti kromium (dalam bentuk Cr(VI) dan Cr(III)), besi (Fe), Nikel (Ni), Mangan (Mn), dan logam berat lainnya. Kromium heksavalen sering menjadi perhatian utama karena sifatnya yang toksik dan dapat berdampak negatif pada ekosistem dan kesehatan manusia. Pencemaran kromium di lingkungan berasal dari proses pertambangan dan pengolahan bijih nikel yang umumnya dilakukan metode penambangan terbuka (*open pit*). Hujan menyebabkan terjadinya aliran permukaan (*runoff*) yang mengangkut material padat tersuspensi dan logam terlarut seperti Krom(VI). [1] Kromium (VI) yang terlarut dalam air sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Logam berat ini memiliki sifat bioakumulatif, yang berarti kadarnya dapat terakumulasi dan meningkat dalam jaringan tubuh organisme

hidup. Logam berat ini sangat beracun dan berdampak buruk terhadap lingkungan, terutama kesehatan manusia. Bahkan pada konsentrasi logam berat yang rendah di dalam air, logam berat tersebut dapat diserap oleh organisme hidup. [2]

Metode konvensional seperti reduksi, *reverse osmosis*, elektrodialisis, metode mikrobiologi, dan adsorpsi telah digunakan untuk menghilangkan Cr(VI) dari air. Namun, masing-masing memiliki beberapa keterbatasan seperti tingginya biaya operasional, konsumsi reagen, produksi lumpur berlebih, kesulitan mencapai konsentrasi aman, dan potensi menghasilkan limbah sekunder yang sulit diolah. [3] Sehingga pada penelitian ini dipilih *Resin Immobilized Photocatalyst Technology (RIPT)* yang merupakan resin yang sudah dilakukan reaksi penyatuan antara resin katalis sehingga tidak sulit dipisahkan dari air olahan.[4] Resin yang digunakan adalah resin Amberlite IR-120 (Na) adalah resin penukar kation asam berbentuk gel yang sangat kuat, terbuat dari polistiren yang disulfonasi. [5] Proses ini memanfaatkan sinar Uv dan fotokatalis ZnO untuk menguraikan Cr(VI) secara langsung menjadi senyawa yang tidak berbahaya.

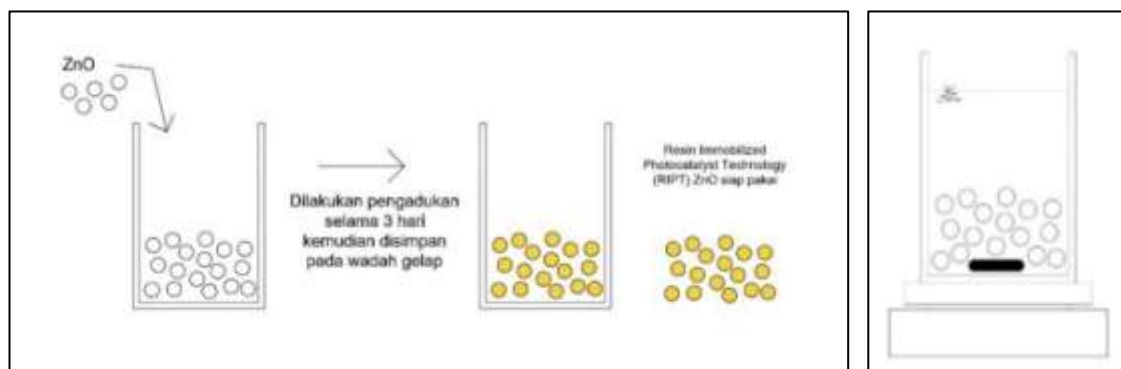
RIPT dipilih karena memiliki kelebihan kemudahan dalam pemisahan dengan katalis. [4] Terdapat berbagai katalis yang dinilai efektif dalam menurunkan parameter Cr(VI), salah satunya adalah ZnO, ZnO merupakan material semikonduktor berbasis oksida yang memiliki sifat unik dan celah pita energi yang dimilikinya sebesar 3,2 elektronvolt (eV) memungkinkan ZnO berperan sebagai fotokatalis, yaitu material yang dapat mempercepat reaksi kimia dengan bantuan energi cahaya [6] Katalis ini dipilih karena memiliki stabilitas yang tinggi, dan merupakan bahan yang relatif tidak beracun dan tidak berbahaya sehingga aman bagi pengolahan lingkungan. Mengacu pada latar belakang ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu kontak, berat RIPT-ZnO, dan pengaruh cahaya Uv-C dalam menyisihkan Cr(VI). Pengukuran kadar Cr(VI) dalam larutan dilakukan menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan *inlet* limbah pertambangan nikel dari pertambangan nikel di Pulau Sulawesi. Peralatan yang digunakan dalam penelitian diantaranya *magnetic stirrer*, *beaker glass*, lampu Uv-C, kertas saring, *lux meter*, Spektrofotometer Uv-vis, labu ukur, neraca analitik, pompa *vacuum*, dan cawan *gooch*. Sedangkan untuk bahan yang digunakan adalah resin amberlite IR-120 Na, serbuk katalis ZnO, dan akuades.

Prosedur Pembuatan RIP-ZnO

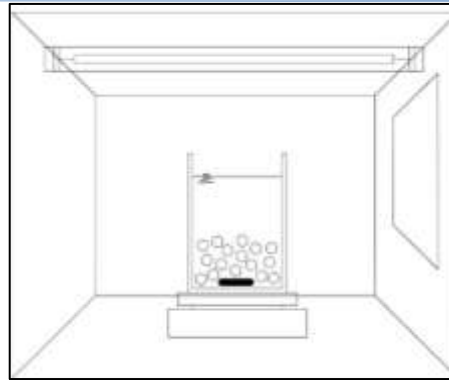
Penelitian ini menggunakan RIPT-ZnO sebagai bahan baku utama. RIPT-ZnO dibuat dengan mencampur katalis, resin, akuades, lalu dilakukan imobilisasi atau pengadukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* agar katalis dapat menempel sempurna pada resin seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 1**. Kemudian dilanjutkan dengan proses pembilasan dan pengeringan RIPT-ZnO agar siap digunakan.



Gambar 1. Proses Pembuatan RIPT-ZnO

Prosedur Pengolahan Cr(VI) dari Air Limbah Nikel

Proses reaksi dilakukan di ruang gelap dengan disinari lampu Uv-C dari atas reaktor sehingga pencahayaan dapat merata mengenai seluruh permukaan RIPT-ZnO [7]. Sebelum dilakukan penelitian, terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik awal air limbah nikel dengan hasil disajikan di **Tabel 1**.



Gambar 2. Proses Reaksi Air Limbah dan RIPT-ZnO

Tabel 1. Karakteristik Awal Limbah Nikel

Parameter	Hasil Pengujian	Baku Mutu
Cr(VI)	0,234 mg/L	Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 9 Tahun 2006
	0,161 mg/L	

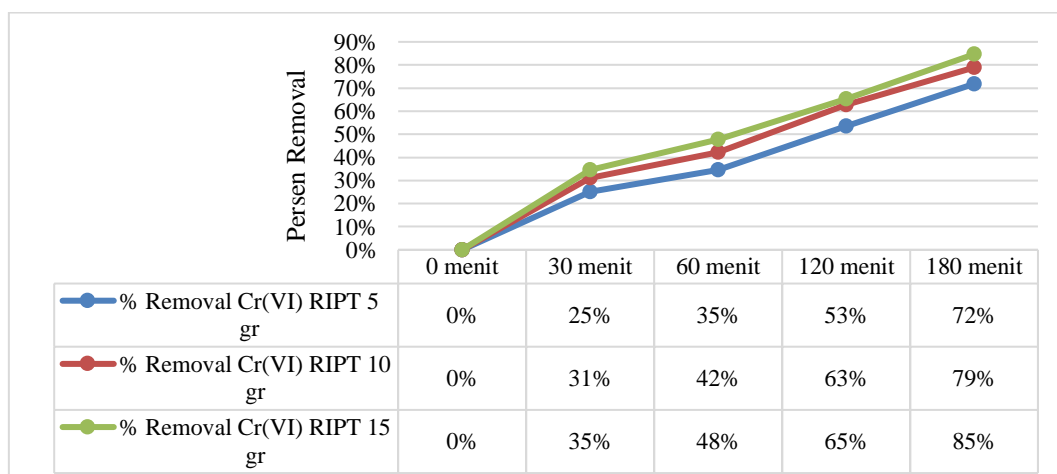
Prosedur awal dimulai dengan menyaring air limbah menggunakan kertas saring agar filtrat dapat digunakan untuk reaksi pada proses degradasi. Dilanjutkan dengan memasukkan filtrat dan RIPT-ZnO dengan berat 15 gram [8] ke reaktor yang selanjutnya akan direaksikan bersamaan dengan menyinari reaktor dengan cahaya sesuai variasi dan melakukan pengambilan sampel sesuai waktu kontak yang telah ditentukan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hubungan Durasi Kontak RIP-ZnO dengan Penurunan Konsentrasi Cr(VI)

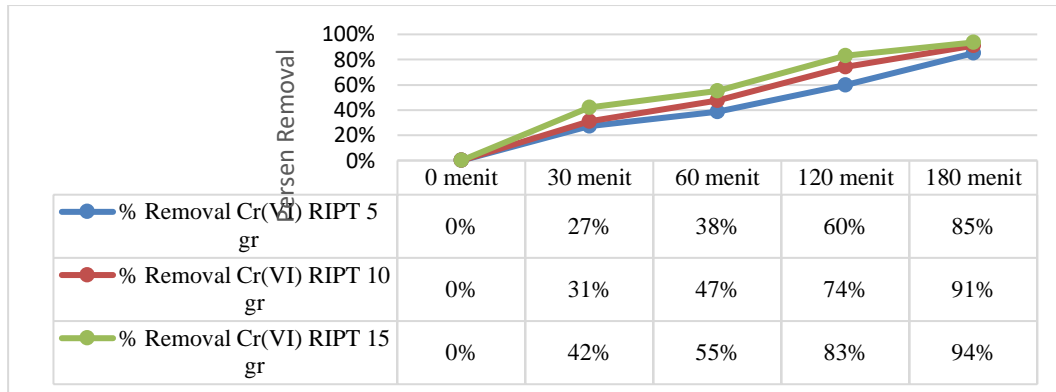
RIP-ZnO diketahui memiliki efisiensi penyisihan yang lebih baik untuk limbah nikel dalam menghilangkan bahan anorganik. Secara keseluruhan, penyisihan krom dalam limbah nikel menunjukkan peningkatan yang sejalan dengan durasi waktu kontak. Persentase penyisihan Cr(VI) meningkat dengan adanya iluminasi atau hamburan cahaya yang terjadi pada fotokatalis ZnO. Dalam reaksi fotokatalisis, proses dimulai dengan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, yang terjadi ketika material semikonduktor menyerap cahaya dengan energi yang setara atau lebih besar dari celah energinya. [9] Proses ini menghasilkan pasangan hole-elektron dalam partikel semikonduktor ZnO, di mana elektron yang tereksitasi berpindah ke pita konduksi.

Selanjutnya, elektron ini berperan dalam mereduksi kromium dari bentuk Cr(VI), yang bersifat sangat toksik, menjadi Cr(III), yang jauh lebih aman dan kurang beracun.[10] Selain memiliki celah pita (band gap) yang besar, serta kualitas listrik, optik, dan mekanik yang unggul, fotokatalis ZnO juga memiliki struktur kristal heksagonal yang lebih mendukung transfer elektron. Berdasarkan teori pita energi, nanopartikel ZnO memiliki celah energi (band gap) sebesar 3,2 eV, yang setara dengan 329,98 kJ/mol. Energi ini memungkinkan terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi setelah foton diserap, yang menghasilkan pasangan h^+ pada pita valensi dan e^- pada pita konduksi [11].



Gambar 3. Hubungan antara Waktu Kontak, Berat RIPT-ZnO dan Penyisihan Cr(VI) pada UV-C 8 watt

Berdasarkan **Gambar 3** diatas perlakuan dengan pencahayaan lampu Uv-C 8 watt dan dapat dilihat bahwa pada berat RIPT-ZnO 5 gram, persen penyisihan tertinggi berada pada waktu kontak 180 menit, yaitu sebesar 72%, kemudian untuk berat RIPT-ZnO 10 gram dengan waktu kontak yang sama di 180 menit, persen removal mengalami kenaikan di nilai tertinggi 79%, dan untuk berat RIPT-ZnO 15 gram kenaikan persen removal maksimal di 85%. disimpulkan bahwa semakin lama waktu kontak antara RIPT-ZnO dan air limbah maka semakin tinggi penyisihan Cr(VI) pada air limbah.



Gambar 4. Hubungan antara Waktu Kontak, Berat RIPT-ZnO dan Penyisihan Cr(VI) pada UV-C 18 watt

Berdasarkan **Gambar 4** diatas perlakuan dengan pencahayaan lampu Uv-C 18 watt dan dapat dilihat bahwa pada berat RIPT-ZnO 5 gram, persen penyisihan tertinggi berada pada waktu kontak 180 menit, yaitu sebesar 85%, kemudian untuk berat RIPT-ZnO 10 gram dengan waktu kontak yang sama di 180 menit, persen removal mengalami kenaikan di nilai tertinggi 91%, dan untuk berat RIPT-ZnO 15 gram kenaikan persen removal maksimal di 94%. disimpulkan bahwa semakin lama waktu kontak antara RIPT-ZnO dan air limbah maka semakin tinggi penyisihan Cr(VI) pada air limbah. Semakin lama waktu kontak RIPT-ZnO dengan air limbah akan semakin tinggi penyisihan Cr(VI). Berdasarkan teori pita energi, nanopartikel ZnO memiliki energi celah (*band gap*) sebesar 3,2 eV, setara dengan 329,98 kJ/mol. Energi ini memungkinkan terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi setelah katalis menyerap foton, yang menghasilkan pasangan h+ di pita valensi dan e- di pita konduksi. [11]

3.2 Pengaruh Berat RIPT-ZnO dengan Efisiensi Penyisihan Cr(VI)

Berdasarkan **Gambar 3** terjadi kenaikan pada removal Cr⁶⁺ pada air limbah, didapatkan hasil penyisihan Cr⁶⁺ dengan menggunakan RIPT-ZnO menunjukkan nilai terendah pada berat RIPT-ZnO 5 gram dengan penyisihan Cr⁶⁺ sebesar 25%, kemudian pada berat RIPT-ZnO 10 gram, penyisihan Cr⁶⁺ berada pada angka terbaik 79% kemudian untuk persen removal tertinggi yaitu pada berat RIPT-ZnO 15 gram dengan penyisihan Cr⁶⁺ sebesar 85%. Menurut data pada **Gambar 4** terjadi kenaikan pada removal Cr(VI) pada air limbah, didapatkan hasil penyisihan Cr⁶⁺ dengan menggunakan RIPT-ZnO menunjukkan nilai terendah pada berat RIPT-ZnO 5 gram dengan penyisihan terbaik Cr⁶⁺ sebesar 85%, kemudian pada berat RIPT-ZnO 10 gram, penyisihan Cr⁶⁺ berada pada angka terbaik 91% kemudian untuk persen removal tertinggi yaitu pada berat RIPT-ZnO 15 gram dengan penyisihan Cr⁶⁺ sebesar 94%.

Semakin banyak RIPT yang digunakan, semakin tinggi persentase reduksi Cr⁶⁺, hal ini disebabkan semakin bertambahnya berat resin yang digunakan, maka semakin besar kapasitas resin dan semakin banyak pula ion Cr⁶⁺ yang terserap dalam resin. [12]

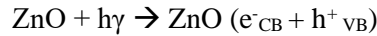
3.3 Pengaruh Intensitas Cahaya Paling Optimal Dalam Penyisihan Kandungan Cr(VI) Pada Air Limbah

Dari hasil pengukuran didapatkan bahwa Intensitas cahaya yang berasal lampu UV-C seiring dengan kenaikan wattnya maka intensitasnya akan semakin tinggi. Pernyataan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [13], yang menunjukkan bahwa struktur elektronik semikonduktor, dengan pita valensi terisi dan pita konduksi kosong, memungkinkan semikonduktor berfungsi sebagai katalis redoks saat terpapar cahaya. Ketika partikel ZnO disinari dengan UV, pasangan *electron-hole* terbentuk. *Hole* pada pita valensi memiliki potensi oksidasi kuat yang menghasilkan radikal OH⁻, agen pengoksidasi kuat yang dapat mendegradasi zat melalui fotokatalisis dan memungkinkan elektron tersedia untuk mereduksi Cr(VI). [14]

Proses fotokatalisis pada dasarnya melibatkan terbentuknya pasangan elektron-hole di permukaan katalis semikonduktor, yang terjadi saat katalis diaktifkan oleh energi foton dengan panjang gelombang

yang sesuai. Elektron yang terionisasi dan mencapai permukaan katalis kemudian dapat mereduksi logam berat Cr(VI). [15]

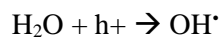
Reduksi fotokatalik Cr(VI) menjadi Cr(III) terjadi saat air limbah bereaksi dengan fotokatalis seperti ZnO terkena paparan sinar UV dengan energi foton yang lebih tinggi dari *energy band gap* fotokatalis semikonduktor. Dalam proses fotokatalisis, adsorpsi berlangsung saat ZnO terlebih dahulu teradsorpsi dalam air limbah yang mengandung Cr(VI). Reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) terjadi karena terbentuknya pasangan elektron hole didalam partikel semikonduktor, dengan persamaan sebagai berikut : (vb *valence band*, cb: *conduction band*)



Setelah spesies ini bermigrasi ke permukaan partikel, fotogenerasi yang menghasilkan elektron mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III), sementara hole mengoksidasi air dan donor elektron. Mekanisme yang mungkin terjadi dalam reduksi fotokatalitik Cr(VI) adalah sebagai berikut :

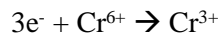


Tanpa keberadaan zat pereduksi, air menerima lubang pita valensi dan siklus redoks fotokatalitik berjalan sesuai dengan mekanisme berikut :

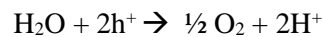


Cr(VI) dapat berupa dalam beberapa bentuk, seperti $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, HCrO_4^- , HCrO_7^- and CrO_4^{2-} dan keberadaan relatif dari suatu kompleks tertentu bergantung pada konsentrasi ion kromium serta pH larutan. Kromium dapat bertahan sebagai anion HCrO_4^- dan anion HCrO_4^- di mana anion ini tertarik secara elektrostatik oleh permukaan material penyerap.

Elektron pita konduksi mereduksi ion logam ke keadaan valensi yang lebih rendah seperti yang diberikan dalam reaksi berikut :



Lubang pita valensi dapat mengoksidasi air untuk menghasilkan oksigen sebagai berikut:



Selain itu, oksigen dalam larutan bertindak sebagai pembersih lubang dan menciptakan H_2O_2 yang juga mereduksi Cr(VI) [10]. Dapat dilihat bahwa kadar Cr(VI) dengan RIPT ZnO yang menggunakan variasi berat RIPT, sumber cahaya, dan waktu kontak menunjukkan persen penurunan.

3.4 Model Regresi Linier untuk Efisiensi Penyisihan Cr(VI) oleh RIPT-ZnO

Hasil uji regresi linier berdasarkan gambar diatas diketahui bahwa beberapa variabel memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel respon, sementara beberapa lainnya tidak signifikan. Berat RIPT memiliki nilai P-Value sebesar 0,000, yang berarti lebih kecil dari α yaitu 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa berat RIPT berperan signifikan dalam memengaruhi hasil. Waktu kontak menunjukkan pengaruh yang sangat signifikan terhadap respon, dengan P-Value sebesar 0,000. Nilai ini menunjukkan bahwa waktu kontak adalah salah satu variabel yang paling berpengaruh dalam model ini. Selain itu, intensitas cahaya juga memiliki dampak signifikan dengan P-Value sebesar 0,000, yang menegaskan bahwa variabel ini berkontribusi secara statistik terhadap variasi dalam respon.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6,74146	97,86%	97,64%	97,27%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	62278,6	20759,5	456,78	0,000
Berat RIPT	1	978,0	978,0	21,52	0,000
Waktu Kontak	1	22484,2	22484,2	494,73	0,000
Intensitas Cahaya	1	5430,4	5430,4	119,49	0,000
Error	30	1363,4	45,4		
Total	33	63642,0			

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Berat RIPT	-0,743	0,160	-4,64	0,000	2,17
Waktu Kontak	-0,3829	0,0172	-22,24	0,000	2,64
Intensitas Cahaya	0,000274	0,000025	10,93	0,000	1,35

Gambar 5. Hasil Analisa Regresi Linier pada Berat RIPT-ZnO, Waktu Kontak terhadap Persen Removal Cr(VI)

Berdasarkan hasil pada model summary di atas, maka model regresi yang digunakan menunjukkan performa yang sangat baik, dengan nilai R-sq sebesar 97,86%, yang berarti model mampu menjelaskan 97,86% variasi dalam data. Nilai R-sq(adj) sebesar 97,64% menunjukkan bahwa setelah penyesuaian untuk jumlah variabel prediktor, model tetap sangat baik dalam menjelaskan data tanpa adanya indikasi overfitting. Sementara itu, nilai R-sq(pred) sebesar 97,27% mengindikasikan kemampuan model untuk memprediksi data baru yang tidak digunakan dalam pelatihan, menunjukkan generalisasi yang sangat baik. Selisih kecil antara R-sq, R-sq(adj), dan R-sq(pred) mengonfirmasi bahwa model ini stabil, optimal, dan dapat diandalkan baik untuk menjelaskan data pelatihan maupun memprediksi data baru, menjadikannya ideal untuk aplikasi praktis.

Hasil analisis menunjukkan bahwa semua variabel independen memiliki dampak yang signifikan terhadap variabel dependen, berdasarkan nilai T-value dan P-value. Variabel Berat RIPT memiliki T-value sebesar -4,64 dengan P-value 0,000, yang menunjukkan pengaruh negatif signifikan terhadap variabel dependen. Variabel Waktu Kontak memiliki T-value sebesar -22,24 dengan P-value 0,000, yang juga menunjukkan pengaruh negatif yang sangat signifikan. Sementara itu, variabel Intensitas Cahaya memiliki T-value sebesar 10,93 dengan P-value 0,000, yang menandakan pengaruh positif signifikan terhadap variabel dependen. Nilai P-value yang berada di bawah 0,05 untuk semua variabel, dapat disimpulkan bahwa ketiga variabel tersebut memberikan kontribusi yang signifikan dalam model ini, baik dalam arah positif maupun negatif.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil Analisa menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis menunjukkan bahwa ZnO dapat menurunkan kadar Cr(VI). Pengujian ini menunjukkan efisiensi penurunan yang optimum yaitu sebesar 96%. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa penggunaan ZnO dalam teknologi imobilisasi fotokatalis pada resin dapat secara signifikan meningkatkan penyisihan kromium heksavalen (Cr(VI)) dari limbah cair nikel. Dosis RIPT sebesar 15 gram menghasilkan penyisihan Cr(VI) tertinggi, dengan efisiensi mencapai 96% pada waktu kontak 180 menit. Selain itu, semakin lama waktu kontak limbah dengan RIPT-ZnO, semakin tinggi tingkat penyisihan Cr(VI). Temuan ini menunjukkan potensi ZnO sebagai katalis yang efisien dalam pengolahan limbah cair nikel, terutama dalam konteks penghilangan logam berat. Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal variasi jenis katalis dan kondisi lingkungan yang lebih bervariasi, sehingga disarankan untuk penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi penggunaan katalis lainnya serta pengaruh parameter lingkungan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada PT. X atas kesempatan dan sarana yang telah diberikan untuk mendukung terlaksananya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada UPN "Veteran" Jawa Timur atas dukungan dan fasilitas yang telah disediakan. Terakhir, penulis juga berterima kasih kepada kedua dosen pembimbing atas panduan, arahan, dan dukungannya yang sangat berarti dalam penyelesaian penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

- [1] A. N. Majalis, N. Wicaksono, Y. Novitasari, N. Permatasari, and R. Pratiwi, "Pengolahan kromium(vi) pada air limbah pertambangan bijih nikel menggunakan besi(ii) yang diperoleh dari slag nikel," *J. Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 18, no. 3, pp. 177–191, 2022, doi: 10.30556/jtmb.vol18.no3.2022.1314.
- [2] R. Arora, "Adsorption of heavy metals-a review," *Mater. Today Proc.*, vol. 18, no. 1, pp. 4745–4750, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.462.

- [3] S. dan R. Hasnah Dewi, "Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Fe₃O₄ Magnetik Untuk Adsorpsi Kromium Heksavalen," *Jurnal Sains Mater. Indones.*, vol. 13, no. 2, pp. 136–140, 2012.
- [4] D. A. Lavyatra, "Perbandingan Efektivitas TiO₂ Dan ZnO Pada Resin Immobilized Photocatalyst Technology (RIPT) Dalam Menyisihkan BOD dan COD Pada Limbah Tahu," UPN Veteran Jawa Timur, 2022.
- [5] Mihaela Ciopec, Adina Negrea, Lavinia Lupa, Corneliu Davidescu, Petru Negrea, and Paula Sfarloagă, "Performance Evaluation of the Fe-IR-120(Na)-DEHPA Impregnated Resin in the Removal Process of As(V) from Aqueous Solution," *J. Mater. Sci. Eng. B*, vol. 1, no. 9, pp. 421–432, 2011, doi: 10.17265/2161-6221/2011.09.004.
- [6] C. M. Arnanto, "Sintesis TiO₂ Dari TiCl₄ Menggunakan Ekstrak Akar Morinda Citrifolia Sebagai Cetakan Dan Uji Fotokatalisisnya Untuk Menguraikan Metil Orange," pp. 1–23, 2015.
- [7] M. Hikmah and N. Wahyuni, "Sintesis Fotokatalis TiO₂ untuk Degradasi Zat Warna Sintetis Metilen Biru dengan Bantuan Sinar Tampak," *J. Teknol. Lingkungan. Lahan Basah*, vol. 11, no. 3, p. 878, 2023, doi: 10.26418/jtlb.v11i3.70903.
- [8] K. K. Ayuningtyas, E. N. Hidayah, and Aussie Amalia, "Kapasitas Resin Immobilized Photocatalyst Technology (RIPT) untuk Menurunkan Parameter Bod Limbah Cair Industri Tahu," *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 5, pp. 595–602, 2022, doi: 10.55123/insologi.v1i5.1002.
- [9] H. Suseno, "Destruksi Senyawa Anorganik Melalui Proses Fotokatalisis Untuk Mengkondisikan Limbah Radioaktif Cair," 2002.
- [10] J. Preethi, M. H. Farzana, and S. Meenakshi, *Photo-reduction of Cr(VI) using chitosan supported zinc oxide materials*, vol. 104, no. Vi. Elsevier B.V., 2017.
- [11] H. A. dan A. A. Syukri Darajat, "Seng Oksida (ZnO) Sebagai Fotokatalis Pada Proses Degradasi Senyawa Biru Metilen," *J. Ris. Kim.*, vol. 1, no. 2, pp. 1978–1979, 2008.
- [12] A. Wahid, N. N. Lifiana, S. Soemargono, and N. K. Erliyanti, "Reduction Of Chromium Ion (Cr⁶⁺) With Ion Exchange Resin In Liquid Waste Of Batik," *Konversi*, vol. 11, no. 1, pp. 26–31, 2022, doi: 10.20527/k.v11i1.12768.
- [13] P. Mitra, P. Banerjee, S. Chakrabarti, D. Sarkar, and S. Bhattacharjee, "Solar photo reduction of hexavalent chromium in wastewater with zinc oxide semiconductor catalyst," *Int. Conf. Environ. 2010 (ICENV 2010)*, vol. 2010, no. Icenv, 2010.
- [14] N. H. Efendi and H. Sutanto, "Pengaruh temperatur sintering terhadap sifat optik lapisan tipis zinc oxide (ZnO) yang dideposisi diatas substrat kaca dan aplikasinya untuk mendegradasi pewarna methylene blue," *Youngster Phys. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 135–142, 2014.
- [15] C. Purnawan and A. K. Ayuningtyas, "Reduksi Logam Berat Chromium (VI) Dengan Fotokatalis Komposit TiO₂ -SiO₂," *J. Bumi Lestari*, vol. 13, no. 2, pp. 257–264, 2013.