Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi
Volume 26, Issue 03, Oktober 2026, 791-796
Webite: https://ji.unbari.ac.id, E-Mail: jiubj.unbari@gmail.com
e-ISSN: 2549-4236 (Online), p-ISSN: 1411-8939 (Print), DOI: 10.33087/jiubj.v26i3.6589

Efektivitas Penggunaan NaOH, PAC, dan TiO_2 dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) pada Limbah Cair Laboratorium

Muhammad Reza*, Marhadi, Endi Adriansyah, Anggrika, Asih Suzana, Monik Kasman
Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Batanghari, Jambi
*Correspondence: reza30122000@gmail.com

ABSTRAK
Limbah cair sisa analisis *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) mengandung logam berat tembaga (Cu) yang berpotensi mencemari lingkungan sehingga perlu diolah sebelum dibuang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas kombinasi metode presipitasi menggunakan NaOH, koagulasi menggunakan *Poly Aluminium Chloride* (PAC), dan adsorpsi menggunakan TiO_2 dalam menurunkan konsentrasi Cu pada limbah cair laboratorium. Pengolahan dilakukan secara bertahap dengan variasi dosis TiO_2 (0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8 g) serta waktu kontak (30, 60, dan 90 menit). Konsentrasi Cu awal sebesar 17,32 mg/L dengan pH 1,19. Setelah pengolahan menggunakan NaOH, PAC, dan TiO_2 pada dosis 0,4 g serta waktu kontak 90 menit, konsentrasi Cu menurun menjadi 0,5516 mg/L dengan efisiensi kumulatif sebesar 96,82%. Selama proses terjadi perubahan pH menjadi 10,25 setelah penambahan NaOH, 6,58 setelah penambahan PAC, dan berada pada kisaran 5,83–6,59 setelah penambahan TiO_2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi NaOH, PAC, dan TiO_2 efektif menurunkan konsentrasi Cu pada limbah cair laboratorium sisa analisis AAS hingga di bawah baku mutu.

Kata kunci: adsorpsi, limbah cair laboratorium, NaOH, PAC, tembaga (Cu), TiO_2

ABSTRACT
Liquid waste generated from analytical activities using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) contains heavy metals such as copper (Cu) and requires treatment before discharge into the environment. This study aimed to determine the effectiveness of a sequential combination of precipitation using NaOH, coagulation using Poly Aluminium Chloride (PAC), and adsorption using TiO_2 in reducing Cu concentrations in laboratory wastewater. The treatment was conducted in stages with variations in TiO_2 dosage (0.2, 0.4, 0.6, and 0.8 g) and contact time (30, 60, and 90 minutes). The initial Cu concentration was 17.32 mg/L with a pH of 1.19. After treatment using NaOH, PAC, and TiO_2 at a dosage of 0.4 g and a contact time of 90 minutes, the Cu concentration decreased to 0.5516 mg/L with an overall removal efficiency of 96.82%. During the process, the pH changed to 10.25 after NaOH addition, 6.58 after PAC addition, and ranged from 5.83 to 6.59 after TiO_2 addition. The results indicate that the combination of NaOH, PAC, and TiO_2 is effective in reducing Cu concentrations in laboratory wastewater from AAS analysis to levels below the quality standard.

***Keywords**: adsorption, copper (Cu), laboratory wastewater, NaOH, PAC, TiO_2*

PENDAHULUAN

Limbah cair laboratorium merupakan salah satu sumber pencemar yang potensial karena mengandung berbagai bahan kimia berbahaya, termasuk logam berat. Limbah tersebut dapat berasal dari bahan kimia kadaluarsa, sisa sampel, sisa reagen, hasil destruksi, maupun air bekas pencucian peralatan laboratorium (Nurhayati, 2018). Pembuangan limbah cair laboratorium secara langsung ke lingkungan tanpa pengolahan berpotensi merusak struktur tanah, mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, serta menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia (Fajri, 2018). Di antara berbagai jenis limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), limbah yang mengandung logam berat seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), seng (Zn), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) memerlukan perhatian khusus karena sifatnya yang toksik, persisten, dan tidak dapat terdegradasi secara alami (*non-biodegradable*).

Salah satu sumber limbah cair laboratorium yang signifikan adalah sisa analisis menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Limbah ini umumnya mengandung logam berat dalam bentuk terlarut dengan konsentrasi yang bervariasi, berasal dari larutan standar, sisa sampel hasil destruksi, serta bahan kimia yang digunakan selama proses analisis. Logam berat memiliki massa jenis tinggi dan bersifat toksik pada konsentrasi tertentu. Di antara logam berat yang sering ditemukan, tembaga (Cu) merupakan unsur esensial bagi organisme dalam jumlah kecil, namun menjadi toksik apabila konsentrasinya berlebihan. Cu dapat menyebabkan kerusakan pada insang ikan, mengganggu proses metabolisme organisme akuatik, serta menurunkan kualitas air (Anggraini et al., 2022; Pratama et al., 2023). Keracunan akut akibat garam tembaga dapat menimbulkan gejala seperti hematemesis, melena, koma, dan ikterus, sehingga kandungan Cu dalam limbah cair wajib dikendalikan sebelum dibuang ke lingkungan sesuai baku mutu yang berlaku (Ajeng & Anzhari, 2016; Maheswari et al., 2017).

Pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat secara optimal sulit dicapai hanya dengan satu metode karena masing-masing metode memiliki

keterbatasan. Metode presipitasi menggunakan natrium hidroksida (NaOH) efektif mengendapkan logam pada kondisi basa melalui pembentukan hidroksida logam yang sukar larut, namun masih menyisakan logam dalam bentuk terlarut. Proses koagulasi menggunakan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dapat membantu mengikat sisa partikel dan logam menjadi flok melalui mekanisme adsorpsi, penjeratan, atau pengendapan bersama, tetapi kurang efektif untuk menurunkan konsentrasi logam yang sudah sangat rendah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi presipitasi dan koagulasi mampu menurunkan kadar logam berat pada limbah laboratorium hingga sekitar 65%, dengan penurunan tertinggi pada kromium (Wilyanda et al., 2015). Penggunaan PAC juga dilaporkan lebih efektif dibandingkan adsorben zeolit dalam menurunkan kadar kromium, dengan efisiensi mencapai 90,15% (Chamidah et al., 2023). Meskipun demikian, pengolahan tahap lanjut tetap diperlukan untuk menyisihkan sisa logam terlarut.

Titanium dioksida (TiO_2) telah banyak dikaji sebagai adsorben logam berat karena memiliki luas permukaan yang relatif besar dan situs aktif yang mampu berinteraksi dengan ion logam. Penggunaan metode adsorpsi sebagai tahap lanjutan setelah presipitasi dan koagulasi diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penyisihan secara keseluruhan. Nurhayati et al. (2018) menyatakan bahwa kombinasi metode koagulasi yang dilanjutkan dengan adsorpsi dapat memberikan penyisihan pencemar yang lebih baik dibandingkan metode tunggal. Namun, kajian mengenai efektivitas rangkaian pengolahan secara berurutan menggunakan NaOH, PAC, dan TiO_2 terhadap logam Cu pada limbah cair sisa analisis AAS masih terbatas, khususnya terkait pengaruh dosis TiO_2 dan waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas kombinasi metode presipitasi menggunakan NaOH, koagulasi menggunakan PAC, dan adsorpsi menggunakan TiO_2 dalam menurunkan konsentrasi logam Cu pada limbah cair laboratorium sisa analisis AAS. Variasi yang dikaji meliputi dosis TiO_2 (0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8 g) serta waktu kontak (30, 60, dan 90 menit) untuk menentukan kondisi pengolahan yang optimum. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif teknologi pengolahan limbah cair laboratorium yang sederhana, efektif, dan sesuai dengan karakteristik limbah yang mengandung logam berat.

METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan April hingga Juni 2026 di Laboratorium PT Jambi Lestari Internasional yang beralamat di Jalan Nusa Indah I No. 59 E, Kelurahan Rawa Sari, Kecamatan Alam Barajo, Kota Jambi. Bahan yang digunakan meliputi sampel limbah cair sisa analisis *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) yang mengandung logam Cu dari Laboratorium PT Jambi Lestari Internasional, larutan natrium hidroksida (NaOH) 1 M, koagulan *Poly Aluminium Chloride* (PAC), adsorben titanium dioksida (TiO_2), dan akuades.

Peralatan yang digunakan terdiri atas spektrofotometer serapan atom (AAS), *pH meter*, *magnetic stirrer*, gelas beker 500 mL dan 250 mL, labu ukur 100 mL, neraca analitik, serta kertas saring *Whatman* No. 42. Penelitian dilakukan secara eksperimen laboratorium dengan pendekatan bertahap (*sequential treatment*). Tahap pertama berupa presipitasi menggunakan NaOH hingga pH 10, dilanjutkan dengan koagulasi menggunakan PAC dosis tetap 1,5 g, kemudian adsorpsi menggunakan TiO_2. Variasi perlakuan hanya diterapkan pada tahap adsorpsi TiO_2, yaitu dosis adsorben (0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8 g) dan waktu kontak (30, 60, dan 90 menit). Setiap perlakuan dilakukan dalam kondisi *batch* dengan pengadukan terkendali.

Tabel 1
Variasi dosis TiO_2 dan waktu kontak pada tahap adsorpsi

Dosis TiO_2 (g)	Waktu Kontak (menit)	Jumlah Perlakuan
0,2	30, 60, 90	3
0,4	30, 60, 90	3
0,6	30, 60, 90	3
0,8	30, 60, 90	3
Total		**12**

Sumber: data diolah

Sampel limbah cair sebanyak 500 mL dimasukkan ke dalam gelas beker 500 mL. Proses presipitasi dilakukan dengan menambahkan larutan NaOH 1 M secara bertahap sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 200 rpm hingga pH mencapai 10. Pengadukan dilanjutkan selama 30 menit, kemudian sampel didiamkan selama 30 menit untuk proses pengendapan.

Filtrat hasil presipitasi selanjutnya diolah dengan PAC. Sebanyak 1,5 g PAC ditambahkan ke dalam filtrat, kemudian dilakukan pengadukan cepat selama 2 menit pada kecepatan 400 rpm, dilanjutkan dengan pengadukan lambat selama 10 menit pada kecepatan 150

rpm hingga terbentuk flok. Sampel kemudian didiamkan hingga terjadi pemisahan antara endapan dan filtrat.

Filtrat hasil koagulasi digunakan pada tahap adsorpsi. TiO_2 ditambahkan sesuai dosis yang telah ditentukan (0,2; 0,4; 0,6; atau 0,8 g), kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 200 rpm sesuai variasi waktu kontak (30, 60, atau 90 menit). Setelah pengadukan, sampel didiamkan selama 15 menit, kemudian disaring menggunakan kertas saring *Whatman* No. 42 untuk memisahkan TiO_2. Filtrat dianalisis kadar logam Cu menggunakan instrumen AAS.

Analisis Data

Data konsentrasi Cu dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung efisiensi penyisihan pada setiap tahap pengolahan serta efisiensi kumulatif. Efisiensi penyisihan tahap dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_{\text{tahap}} = \frac{C_{\text{sebelum}} - C_{\text{sesudah}}}{C_{\text{sebelum}}} \times 100\%$$

Keterangan: η_{tahap}= efisiensi penyisihan tahap (%), C_{sebelum}= konsentrasi Cu sebelum tahap pengolahan (mg/L), C_{sesudah}= konsentrasi Cu setelah tahap pengolahan (mg/L).

Efisiensi kumulatif dihitung berdasarkan konsentrasi awal limbah terhadap konsentrasi setelah seluruh rangkaian pengolahan:

$$\eta_{\text{kumulatif}} = \frac{C_0 - C_{\text{akhir}}}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan: $\eta_{\text{kumulatif}}$= efisiensi penyisihan kumulatif (%), C_0= konsentrasi Cu awal limbah (mg/L), C_{akhir}= konsentrasi Cu setelah seluruh rangkaian NaOH–PAC–TiO_2 (mg/L).

Khusus untuk tahap adsorpsi TiO_2, konsentrasi Cu setelah proses NaOH + PAC digunakan sebagai konsentrasi awal. Efisiensi penyisihan oleh TiO_2 dihitung dengan persamaan:

$$\eta_{TiO_2} = \frac{C_{\text{NaOH+PAC}} - C_{\text{akhir}}}{C_{\text{NaOH+PAC}}} \times 100\%$$

Keterangan: η_{TiO_2}= efisiensi penyisihan oleh TiO_2 (%), $C_{\text{NaOH+PAC}}$= konsentrasi Cu setelah perlakuan NaOH dan PAC (mg/L), C_{akhir}= konsentrasi Cu setelah adsorpsi TiO_2 (mg/L).

Hasil perhitungan efisiensi pada berbagai variasi dosis TiO_2 dan waktu kontak digunakan untuk menentukan kondisi optimum pengolahan.

HASIL

Limbah cair sisa analisis *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) memiliki konsentrasi Cu awal sebesar 17,32 mg/L dan pH 1,19. Nilai pH yang sangat asam menunjukkan pengaruh kuat dari reagen asam yang digunakan pada proses destruksi dan analisis. Meskipun konsentrasi Cu masih berada di bawah baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014, pengendalian logam Cu tetap diperlukan karena sifat toksiknya terhadap ekosistem perairan.

Perubahan pH pada setiap tahap pengolahan disajikan pada Tabel 2. Penambahan NaOH meningkatkan pH dari 1,19 menjadi 10,25, menciptakan kondisi basa yang mendukung presipitasi hidroksida logam. Setelah penambahan *Poly Aluminium Chloride* (PAC), pH menurun menjadi 6,58 akibat pelepasan ion H^+. Pada tahap adsorpsi TiO_2, pH relatif stabil pada kisaran 5,83–6,59, yang berada dalam rentang optimum adsorpsi logam berat oleh TiO_2 (Hegazi, 2013).

Tabel 2
Perubahan pH pada setiap tahap pengolahan

Tahap Pengolahan	pH
Limbah awal	1,19
Setelah penambahan NaOH	10,25
Setelah penambahan NaOH + PAC	6,58
Setelah penambahan NaOH + PAC + TiO_2	5,83–6,59

Sumber: data diolah

Pengolahan secara bertahap menghasilkan penurunan konsentrasi Cu yang signifikan. Pada tahap presipitasi menggunakan NaOH, konsentrasi Cu menurun dari 17,32 mg/L menjadi 2,05 mg/L dengan efisiensi tahap sebesar 88,16%. Penurunan ini terjadi melalui mekanisme pembentukan $Cu(OH)_2$ yang memiliki kelarutan rendah pada kondisi basa (pH 10,25). Hasil ini sejalan dengan temuan Ghony et al. (2023) yang menunjukkan bahwa penambahan NaOH efektif menurunkan kadar Cu melalui proses presipitasi. Meskipun efisiensi tahap ini tinggi, masih terdapat sisa Cu terlarut yang perlu diolah lebih lanjut.

Tahap koagulasi menggunakan PAC selanjutnya menurunkan konsentrasi Cu dari 2,05 mg/L menjadi 1,42 mg/L (efisiensi tahap 30,73%). Meskipun efisiensi tahap PAC lebih rendah dibandingkan NaOH, PAC tetap memberikan kontribusi penting karena konsentrasi Cu yang masuk ke tahap ini sudah jauh berkurang. Penyisihan Cu oleh PAC terjadi melalui mekanisme adsorpsi ion logam pada permukaan flok, penjeratan (*sweep flocculation*), serta pengendapan bersama spesies hidroksida aluminium yang terbentuk selama proses koagulasi. Penurunan pH dari 10,25 menjadi 6,58 setelah penambahan PAC juga mendukung pembentukan flok.

Hasil ini memperkuat temuan Wilyanda et al. (2015) bahwa kombinasi presipitasi dan koagulasi lebih efektif dibandingkan metode tunggal dalam menurunkan logam berat pada limbah laboratorium.

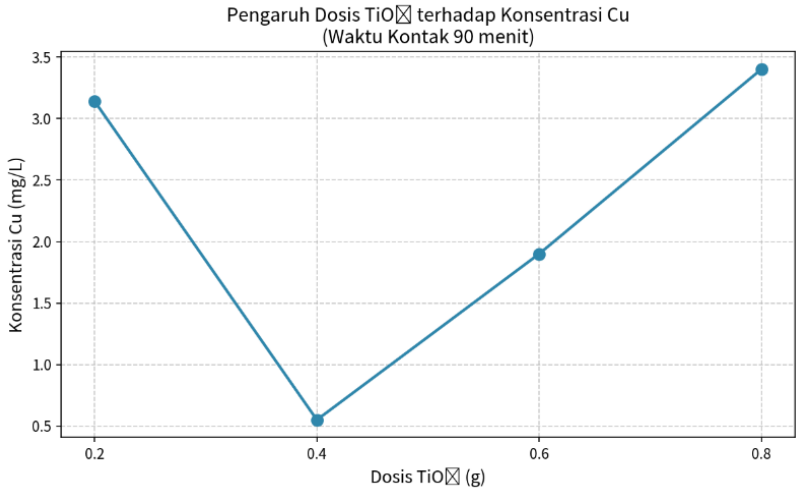
Pada tahap adsorpsi menggunakan TiO_2, efisiensi tahap mencapai 61,15% (dari 1,42 mg/L menjadi 0,5516 mg/L). Nilai ini menunjukkan bahwa TiO_2 efektif menyisihkan sisa Cu terlarut yang tidak terendapkan pada dua tahap sebelumnya. Hasil konsentrasi Cu setelah tahap adsorpsi TiO_2 pada berbagai variasi dosis dan waktu kontak disajikan pada Tabel 3. Kondisi optimum diperoleh pada dosis TiO_2 0,4 g dengan waktu kontak 90 menit, yang menghasilkan konsentrasi akhir Cu sebesar 0,5516 mg/L.

Tabel 3
Konsentrasi Cu (mg/L) setelah pengolahan NaOH + PAC + TiO_2

Dosis TiO_2 (g)	30 menit	60 menit	90 menit
0,2	2,21	1,35	3,14
0,4	4,44	6,16	0,5516
0,6	3,03	2,76	1,90
0,8	3,23	4,53	3,40

Sumber: data diolah

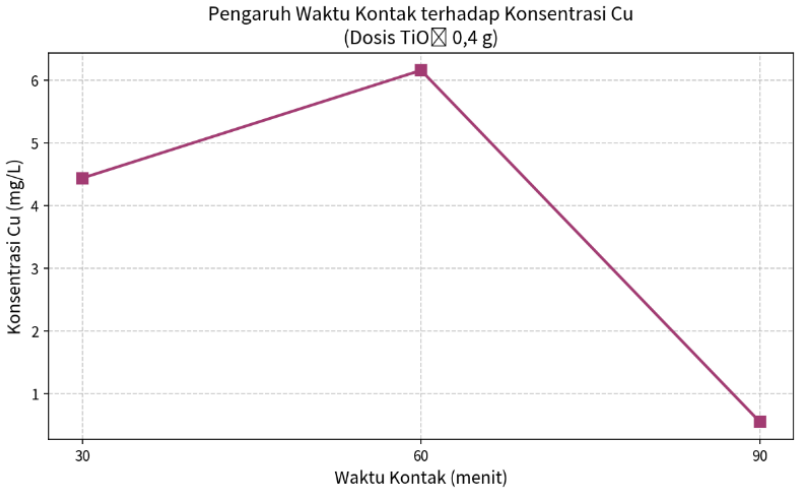
Pengaruh dosis TiO_2 terhadap konsentrasi Cu pada waktu kontak 90 menit ditunjukkan pada Gambar 1. Konsentrasi Cu menurun secara signifikan hingga dosis 0,4 g, kemudian meningkat kembali pada dosis 0,6 g dan 0,8 g. Peningkatan kembali ini mengindikasikan terjadinya aglomerasi partikel adsorben pada dosis berlebih sehingga mengurangi luas permukaan efektif dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengikat ion Cu^{2+}. Fenomena serupa dilaporkan oleh Naat et al. (2022), yang menyatakan bahwa peningkatan dosis adsorben hanya efektif hingga titik optimum.



Sumber: data diolah

Gambar 1
Pengaruh dosis TiO_2 terhadap konsentrasi Cu (waktu kontak 90 menit)

Pengaruh waktu kontak pada dosis optimum (0,4 g) ditunjukkan pada Gambar 2. Pada waktu kontak 30 dan 60 menit, konsentrasi Cu masih relatif tinggi karena proses difusi ion Cu^{2+} menuju situs aktif permukaan TiO_2 belum mencapai kesetimbangan. Waktu kontak 90 menit memberikan hasil terbaik karena memberikan kesempatan yang lebih lama bagi ion logam untuk berinteraksi dengan permukaan adsorben. Kondisi pH setelah penambahan TiO_2 yang berada pada kisaran 5,83–6,59 juga mendukung proses adsorpsi.



Sumber: data diolah

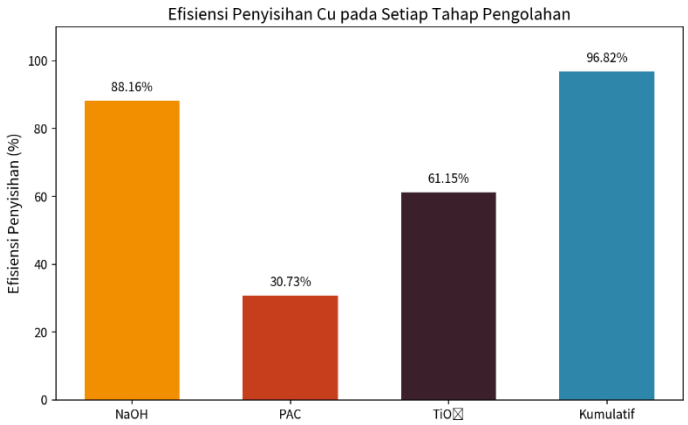
Gambar 2
Pengaruh waktu kontak terhadap konsentrasi Cu (dosis TiO_2 0,4 g)

Efisiensi penyisihan pada setiap tahap serta efisiensi kumulatif disajikan pada Tabel 4 dan divisualisasikan pada Gambar 3. Tahap NaOH memberikan kontribusi terbesar terhadap penyisihan Cu. PAC dan TiO_2 berperan sebagai tahap lanjutan yang menyempurnakan penyisihan sisa logam terlarut. Efisiensi kumulatif sebesar 96,82% menunjukkan bahwa kombinasi metode NaOH–PAC–TiO_2 efektif menurunkan konsentrasi Cu pada limbah cair laboratorium sisa analisis AAS hingga berada jauh di bawah baku mutu yang berlaku.

Tabel 4
Konsentrasi dan efisiensi penyisihan Cu pada setiap tahap

Tahap Pengolahan	Konsentrasi Sebelum (mg/L)	Konsentrasi Sesudah (mg/L)	Efisiensi Tahap (%)	Efisiensi Kumulatif (%)
NaOH	17,32	2,05	88,16	88,16
PAC	2,05	1,42	30,73	91,80
TiO_2 (0,4 g; 90 menit)	1,42	0,5516	61,15	96,82
Kombinasi NaOH + PAC + TiO_2	17,32	0,5516	–	96,82

Sumber: data diolah



Sumber: data diolah

Gambar 3
Efisiensi penyisihan Cu pada setiap tahap pengolahan

Secara keseluruhan, setiap tahap memiliki peran spesifik: NaOH berfungsi sebagai tahap utama penyisihan melalui presipitasi, PAC berfungsi menyempurnakan penyisihan melalui pembentukan flok, dan TiO_2 berfungsi sebagai *polishing treatment* untuk menurunkan konsentrasi Cu yang tersisa. Pola ini sejalan dengan konsep pengolahan berlapis (*multi-stage treatment*) yang dikemukakan oleh Ariani dan Rahayu

(2016), di mana kombinasi metode mampu mengatasi keterbatasan masing-masing proses. Dengan demikian, kombinasi metode yang digunakan dalam penelitian ini efektif dan berpotensi diterapkan sebagai alternatif pengolahan limbah cair laboratorium yang mengandung logam Cu

SIMPULAN

Pengolahan limbah cair sisa analisis *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) secara bertahap menggunakan NaOH, *Poly Aluminium Chloride* (PAC), dan TiO_2 mampu menurunkan konsentrasi logam Cu secara signifikan. Konsentrasi Cu awal sebesar 17,32 mg/L dengan pH 1,19 menurun menjadi 0,5516 mg/L setelah rangkaian pengolahan, dengan efisiensi kumulatif sebesar 96,82%. Kondisi optimum diperoleh pada dosis TiO_2 0,4 g dan waktu kontak 90 menit.

Tahap presipitasi menggunakan NaOH memberikan kontribusi terbesar terhadap penyisihan Cu (efisiensi tahap 88,16%), diikuti oleh adsorpsi TiO_2 (efisiensi tahap 61,15%) dan koagulasi PAC (efisiensi tahap 30,73%). Selama proses pengolahan terjadi perubahan pH dari 1,19 menjadi 10,25 setelah penambahan NaOH, menurun menjadi 6,58 setelah penambahan PAC, dan stabil pada kisaran 5,83–6,59 setelah penambahan TiO_2.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi metode NaOH–PAC–TiO_2 efektif dalam menurunkan konsentrasi Cu pada limbah cair laboratorium hingga berada jauh di bawah baku mutu yang berlaku. Metode ini berpotensi diterapkan sebagai alternatif pengolahan limbah cair laboratorium yang mengandung logam berat.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi dosis TiO_2 yang lebih rapat di sekitar dosis optimum (0,4 g) untuk memperoleh kondisi yang lebih akurat. Perlu dilakukan kajian terhadap modifikasi atau kombinasi adsorben lain untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap berbagai jenis logam berat secara simultan. Pengujian pada skala yang lebih besar serta analisis terhadap parameter tambahan (seperti COD, TSS, atau logam berat lain) perlu dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan penerapan metode ini pada skala laboratorium maupun industri.

DAFTAR PUSTAKA

Ajeng, R., & Anzhari, A. (2016). Pembuatan Adsorben Dari Kulit Buah Kakao Sebagai Adsorben Logam Berat. *Skripsi*. Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Anggraini, N., Agustina, T. E., & Hadiah, F. (2022). Pengaruh pH dalam pengolahan air limbah laboratorium dengan metode adsorpsi untuk penurunan kadar logam berat Pb, Cu, dan Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345–355. https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355

Ariani, M. D., & Rahayu, D. (2016). Penyisihan logam berat dari limbah cair laboratorium kimia. *Farmaka*, 14(4), 89–97. https://doi.org/10.24198/jf.v14i4.10595

Fajri, N. (2018). Pengelolaan limbah laboratorium kimia di perguruan tinggi. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan*, 5(1), 22–30.

Ghony, M. A., Prihatin, T., & Rizky, C. A. (2023). Pengaruh presipitasi NaOH dan $Ca(OH)_2$ terhadap penurunan kadar tembaga pada limbah cair PLTU Tanjung Enim 3 × 10 MW (PT. BEST). *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 1(1), 24–28. https://doi.org/10.62278/jits.v1i1.5

Hegazi, H. A. (2013). Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents. *HBRC Journal*, 9(3), 276–282. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.004

Maheswari, M., Suresh, S., & Kavitha, B. (2017). Removal of copper from aqueous solution using agricultural waste as adsorbent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(5), 1021–1030.

Naat, J. N., Neolaka, Y. A. B., Lapailaka, T., & Riwu, A. A. P. (2022). Adsorption of Cu(II) on silica gel from natural sand of Takari-NTT modified with polyethylene glycol. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 9(3), 201–208.

Nurhayati. (2018). Pengolahan limbah cair laboratorium dengan adsorpsi dan pretreatment netralisasi dan koagulasi. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 10(2), 112–120.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. (2014). Kementerian Lingkungan Hidup.

Pratama, A., Sari, R. N., & Hidayat, T. (2023). Kandungan logam berat tembaga (Cu) pada limbah cair dan dampaknya terhadap kualitas air. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 13(1), 78–86.

Thahir, R., Wahyuni, N., & Nuryono. (2018). Adsorpsi ion Cu(II) menggunakan TiO_2 mesopori. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(2), 245–252.

Wilyanda, Yelmida, & Chairul. (2015). Pengolahan limbah cair logam berat (limbah B3) secara presipitasi dan koagulasi di UPT Pengujian Dinas Pekerjaan Umum. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*, 2(2), 1–10.