

Evaluasi Kinerja dan Keterbatasan *Scirpus grossus* pada Adsorpsi-Fitoremediasi Limbah Cair Industri Batik

Isna Apriani*, Margaretha Palma Audry Lith, dan Arifin

Department of Engineering, Universitas Tanjungpura, Indonesia; e-mail: isnaapriani@teknik.untan.ac.id

ABSTRAK

Industri batik menghasilkan limbah cair dengan kandungan pencemar tinggi seperti kromium heksavalen (Cr^{6+}), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan warna, yang melebihi baku mutu limbah cair industri tekstil (Permen LHK No. P.16/2019). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi kombinasi metode adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit dengan fitoremediasi menggunakan tanaman *Scirpus grossus* (Mensiang) dalam menurunkan kadar pencemar pada limbah cair batik. Proses adsorpsi dilakukan dengan sistem batch, kemudian dilanjutkan fitoremediasi selama 16 hari. Parameter yang diuji meliputi COD, Cr^{6+} , dan warna. Waktu pengamatan dengan hasil terbaik penurunan parameter limbah cair batik dengan fitoremediasi menggunakan *Scirpus grossus* diperoleh pada hari ke-12. Konsentrasi Cr^{6+} berhasil diturunkan dari 2,3 mg/L menjadi <0,001 mg/L dengan efisiensi >99,9%. Nilai COD turun dari 11.971 mg/L menjadi 367,3 mg/L dengan efisiensi 97%, dan warna menurun dari 3.416 Pt-Co menjadi 180 Pt-Co dengan efisiensi 95%. Meskipun Cr^{6+} telah memenuhi baku mutu ($\leq 1,0$ mg/L), parameter COD dan warna masih melebihi standar (150 mg/L dan 200 Pt-Co). Dengan demikian, kombinasi metode adsorpsi-fitoremediasi mampu menurunkan konsentrasi Cr^{6+} , COD, dan warna pada limbah cair batik, dengan kontribusi penyisihan terbesar terhadap COD dan warna terjadi pada tahap adsorpsi, sedangkan pengolahan lanjutan tetap diperlukan untuk mencapai baku mutu. Metode ini berpotensi menjadi alternatif ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair batik, khususnya sebagai tahap pra-pengolahan atau pengolahan antara.

Kata kunci: adsorpsi, fitoremediasi, kromium heksavalen, limbah cair batik, *Scirpus grossus*

ABSTRACT

The batik industry generates wastewater containing high levels of pollutants, such as hexavalent chromium (Cr^{6+}), Chemical Oxygen Demand (COD), and color, which exceed the wastewater quality standards for the textile industry (Minister of Environment and Forestry Regulation No. P.16/2019). This study aimed to evaluate the efficiency of a combined adsorption method using activated carbon and zeolite with phytoremediation using *Scirpus grossus* (Mensiang) to reduce pollutant concentrations in batik wastewater. The adsorption process was conducted using a batch system, followed by phytoremediation for 16 days. The parameters analyzed included COD, Cr^{6+} , and color. The best observation time for reducing batik wastewater parameters through phytoremediation using *Scirpus grossus* was obtained on day 12. The Cr^{6+} concentration was successfully reduced from 2.3 mg/L to <0.001 mg/L, with an efficiency of >99.9%. The COD concentration decreased from 11,971 mg/L to 367.3 mg/L, with an efficiency of 97%, while the color decreased from 3,416 Pt-Co to 180 Pt-Co, with an efficiency of 95%. Although the Cr^{6+} concentration met the wastewater quality standard (≤ 1.0 mg/L), the COD and color parameters remained above the applicable standards (150 mg/L and 200 Pt-Co, respectively). Thus, the combined adsorption-phytoremediation method was able to reduce Cr^{6+} , COD, and color concentrations in batik wastewater, with the greatest removal contribution for COD and color occurring during the adsorption stage, while further treatment is still required to meet the wastewater quality standards. This method has the potential to serve as an environmentally friendly alternative for batik wastewater treatment, particularly as a pre-treatment or intermediate treatment stage.

Keywords: adsorption, phytoremediation, hexavalent chromium, batik wastewater, *Scirpus grossus*

Citation: Apriani, I., Lith, M. P. A., dan Arifin. (2026). Evaluasi Kinerja dan Keterbatasan *Scirpus grossus* pada Adsorpsi-Fitoremediasi Limbah Cair Industri Batik Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(4), 1034-1041, doi:10.14710/jil.24.4. 1034-1041

1. PENDAHULUAN

Limbah cair batik merupakan hasil samping dari proses pewarnaan kain yang mengandung campuran senyawa organik dan anorganik yang sulit terurai (Maria, 2019). Limbah ini terbentuk dari penggunaan

zat warna sintetis serta bahan kimia tambahan yang menyebabkan tingginya konsentrasi warna, COD, BOD, fenol, dan logam berat seperti krom heksavalen (Cr^{6+}). Karakteristik limbah cair batik sangat bervariasi, tergantung pada jenis pewarna yang

digunakan, teknik produksi, serta intensitas pencucian dan fiksasi warna. Stabilitas pewarna sintetis menyebabkan senyawa ini tidak mudah dan membutuhkan waktu lama untuk terdegradasi di lingkungan, sehingga berpotensi menjadi polutan yang mengganggu keseimbangan ekosistem perairan. Kandungan senyawa organik yang tinggi juga dapat meningkatkan toksisitas dan berdampak pada kualitas ekosistem air (Sulaksono et al., 2015).

Permasalahan pembuangan limbah batik masih banyak dijumpai di Indonesia. Salah satunya terjadi pada industri batik di Kota Singkawang, Kalimantan Barat. Industri batik di Kampung Wisata Ragam Corak Tiga Penjuru diketahui membuang limbah cairnya langsung ke badan air tanpa proses pengolahan sehingga dapat memicu penurunan kualitas air dan berdampak pada biota perairan maupun kesehatan masyarakat. Kondisi serupa juga ditemukan dalam penelitian Nugraha (2023) yang menyatakan bahwa limbah pewarna naphthol memiliki pH hingga 11, COD 568 mg/L, warna 150 Pt-Co, dan kadar Cr sebesar 2,3 mg/L. Nilai tersebut melebihi baku mutu air limbah tekstil berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16 Tahun 2019, yaitu pH 6–9, COD 150 mg/L, Cr^{6+} 1 mg/L, dan warna 200 Pt-Co.

Berbagai metode pengolahan telah dikembangkan untuk menurunkan kadar pencemar pada limbah tekstil. Beberapa teknologi seperti koagulasi-flokulasi, adsorpsi, dan fitoremediasi banyak diterapkan, namun efektivitasnya masih bervariasi bergantung pada karakteristik limbah dan kondisi proses (Azwardi & Triyono, 2019). Adsorpsi merupakan salah satu teknologi yang banyak dikaji untuk pengolahan limbah cair batik karena karakteristik limbah batik umumnya menunjukkan beban COD dan parameter pencemar lainnya yang melebihi baku mutu. Berbagai jenis adsorben telah dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas pengolahan limbah tersebut (Handayani, 2025).

Fitoremediasi memiliki keunggulan karena sederhana, ekonomis, dan mampu diaplikasikan pada skala industri kecil seperti batik. Tanaman air seperti Mensiang (*Scirpus grossus*) diketahui mampu menyerap senyawa organik maupun anorganik, termasuk logam berat. Sementara itu, adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit efektif mengikat polutan melalui mekanisme fisik dan kimia.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode pengolahan tunggal belum efektif secara optimal dalam menurunkan parameter COD, fenol, dan warna. Integrasi metode adsorpsi dan fitoremediasi berpotensi meningkatkan efisiensi penyisihan pencemar melalui kombinasi mekanisme fisik-kimia dan biofisik, khususnya dengan penggunaan sistem batch yang mampu meningkatkan kontak antara limbah dan media adsorben. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan menggunakan limbah sintetis atau beban pencemar rendah, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi limbah batik aktual di

lapangan serta masih minim mengkaji keterbatasan biologis tanaman pada paparan pencemar tinggi.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja, waktu pengamatan dengan hasil terbaik, dan keterbatasan biologis tanaman pada sistem kombinasi adsorpsi–fitoremediasi dalam pengolahan limbah cair batik skala industri kecil, guna menilai efektivitas penyisihan COD, Cr^{6+} , dan warna serta kesesuaiannya terhadap baku mutu limbah tekstil yang berlaku. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi aplikatif berupa data empiris mengenai efektivitas dan keterbatasan operasional sistem adsorpsi–fitoremediasi dalam kondisi lapangan yang realistis. Kebaruan penelitian ini bersifat aplikatif-kontekstual, yaitu pada evaluasi aplikatif-kontekstual sistem adsorpsi–fitoremediasi pada limbah batik aktual dengan beban pencemar tinggi dan kajian terhadap keterbatasan biologis *Scirpus grossus*.

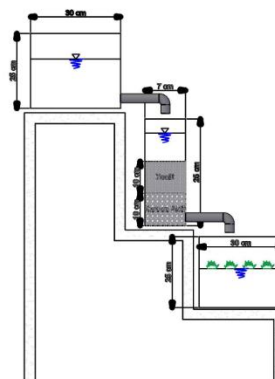
2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan sampel limbah cair batik yang berasal dari industri rumahan yang dikenal dengan Kampung Wisata Ragam Corak Tiga Penjuru Singkawang atau batik Cisadane yang beralamat di Jalan Tani, Gang Cisadane, Kelurahan Pasiran, Kecamatan Singkawang Barat. Lokasi penelitian dilaksanakan di Workshop Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Penelitian dilakukan pada bulan Juli hingga Agustus 2025.

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian menggunakan tiga bak reaktor, yaitu bak inlet, bak adsorpsi, dan bak fitoremediasi. Bak inlet dan bak fitoremediasi berukuran 28 cm × 28 cm × 28 cm, sedangkan bak adsorpsi berukuran 20 cm × 20 cm × 40 cm. Bak adsorpsi diisi dengan media karbon aktif dan zeolit dengan ketebalan masing-masing 10 cm. Proses adsorpsi dilakukan selama 10 jam. Setelah proses adsorpsi, sebanyak 20 L efluen dialirkan ke bak fitoremediasi yang berisi 10 batang tanaman *Scirpus grossus*. Proses fitoremediasi dilakukan selama 12 dan 16 hari, dengan pengambilan sampel pada masing-masing waktu pengamatan untuk analisis COD, Cr^{6+} , dan warna.



Gambar 1. Rangkaian Alat Penelitian

2.3. Sampling

Sampel air limbah diambil dari industri batik Galeri Kote Singkawang, Jalan Tani Gang Cisadane, Kelurahan Pasiran, Kecamatan Singkawang Barat, Kalimantan Barat, menggunakan metode grab sampling sesuai SNI 6989.59:2008. Sampel diambil langsung dari bak penampungan akhir menggunakan gayung bergagang, kemudian dimasukkan ke dalam tiga jerigen berkapasitas 30 L tanpa proses pengawetan, karena analisis dilakukan kurang dari 24 jam setelah pengambilan.

Penelitian ini terdiri atas dua tahap pengolahan utama, yaitu adsorpsi dan fitoremediasi. Pada tahap adsorpsi, digunakan reaktor kaca berukuran 20 × 20 × 40 cm yang berisi lapisan karbon aktif dan zeolit masing-masing setinggi 10 cm. Proses adsorpsi dilakukan secara batch selama 10 jam untuk menurunkan kadar awal pencemar, dengan efluen hasil adsorpsi dialirkan sebanyak 20 L ke tahap fitoremediasi. Tahap fitoremediasi dilakukan menggunakan tanaman mensiang (*Scirpus grossus*) sebanyak 10 batang dalam bak berukuran 28 × 28 × 28 cm selama 12 dan 16 hari. Pengambilan sampel dilakukan pada hari ke-12 dan ke-16 untuk dianalisis terhadap parameter warna, krom heksavalen (Cr^{6+}), dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Sebelum digunakan, adsorben diaktivasi terlebih dahulu. Zeolit digerus dan diayak, kemudian diaktivasi menggunakan HCl 1 M selama 80 menit, dicuci hingga pH netral, dan dikalsinasi pada suhu 105 °C selama 2 jam. Karbon aktif diaktivasi menggunakan larutan H_2SO_4 dan NaOH (0,5–1 N) selama 1–5 jam, dicuci hingga pH netral, dan dikeringkan pada suhu 110 °C selama 24 jam. Proses aklimatisasi tanaman dilakukan selama tujuh hari secara bertahap dalam media berisi 25%, 50%, dan 100% limbah cair batik untuk menyesuaikan tanaman terhadap kondisi lingkungan limbah. Setelah proses aklimatisasi, tanaman dengan kondisi paling sehat digunakan dalam tahap fitoremediasi.

2.4. Replikasi

Penelitian dilakukan dengan dua replikasi perlakuan (duplo), yaitu dua unit perlakuan yang dilakukan secara terpisah dengan kondisi perlakuan yang sama. Masing-masing replikasi dianalisis di laboratorium untuk parameter COD, Cr^{6+} , dan warna. Nilai yang disajikan merupakan nilai rata-rata dari kedua replikasi.

Penelitian ini tidak menggunakan kelompok kontrol berupa perlakuan tanpa tanaman maupun tanpa adsorben. Oleh karena itu, kontribusi masing-masing tahap adsorpsi dan fitoremediasi tidak dapat dipisahkan secara eksperimental, sehingga hasil penelitian merepresentasikan kinerja sistem kombinasi secara keseluruhan. Ketidadaan kelompok kontrol tersebut merupakan salah satu keterbatasan desain penelitian yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil.

2.5. Analisis Data

Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair Industri Batik

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
COD	mg/L	150
Krom (Cr^{6+})	mg/L	1,0
Warna	Pt-Co	200

* Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/Menlhk/Setjen/Kum1/4/2019

Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan menghitung perubahan konsentrasi dan efisiensi penyisihan parameter COD, Cr^{6+} , dan warna sebelum dan sesudah perlakuan. Uji Paired Sample t-Test digunakan sebagai analisis pendukung untuk mengevaluasi perbedaan antara nilai sebelum dan sesudah perlakuan. Mengingat jumlah replikasi perlakuan terbatas, hasil uji statistik diinterpretasikan secara hati-hati dan tidak digunakan sebagai dasar untuk melakukan generalisasi terhadap populasi yang lebih luas, dengan bantuan perangkat lunak SPSS versi 25.0.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan sampel dilakukan empat kali yaitu sebelum adsorpsi, setelah adsorpsi, fitoremediasi hari ke-12 dan fitoremediasi hari ke-16. Analisis karakteristik sampel dilakukan sebelum tahap adsorpsi untuk membandingkan persentase penyisihan parameter sebelum dan sesudah percobaan penelitian. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Limbah Cair Industri Batik Cisadane

Parameter	Hasil Pengujian	Baku Mutu
COD	11.971 mg/L	*150
Cr^{6+}	2.3 mg/L	*1,0
Warna	3.416 Pt-Co	*200
Warna	3.416 Pt-Co	*200

* Baku Mutu Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/Menlhk/Setjen/Kum1/4/2019

3.1. Adsorpsi

Proses adsorpsi menggunakan kombinasi karbon aktif dan zeolit terbukti efektif dalam menurunkan beberapa parameter pencemar pada limbah cair batik Cisadane. Nilai pH turun dari 10,15 menjadi 6,58 sehingga telah memenuhi baku mutu (6–9), sedangkan suhu hanya meningkat sedikit dari 31,6 °C menjadi 32,2 °C dan masih dalam batas normal.

Penurunan COD terbesar terjadi pada tahap adsorpsi menggunakan kombinasi karbon aktif dan zeolit. Konsentrasi COD pada sampel limbah yang diambil dari bak penampungan akhir tercatat sebesar 11.971 mg/L, kemudian menurun menjadi 574,3 mg/L dengan efisiensi mencapai 95,2%. Nilai tersebut menunjukkan beban pencemar yang tinggi pada sampel saat pengambilan dan tidak dimaksudkan sebagai representasi karakteristik umum limbah batik. Hasil ini menunjukkan kinerja adsorpsi yang efektif pada kondisi sampel dengan beban pencemar tinggi serta Cr^{6+} dari 2,3 mg/L menjadi 0,6 mg/L

dengan efisiensi 74%, yang sudah memenuhi baku mutu (<1 mg/L). Warna limbah juga berkurang dari 3.416 Pt-Co menjadi 362,3 Pt-Co dengan efisiensi 89,73%, meskipun masih belum memenuhi standar 200 Pt-Co.

Tabel 3. Nilai Konsentrasi Setelah Dilakukan Pengolahan Adsorpsi

Parameter	A0	A1	Baku Mutu	Efisiensi Penyisihan (%)
COD (mg/L)	11.971	574,3	150	95,2
Krom (mg/L)	2,3	0,6	1	74
Warna (Pt-Co)	3,416	363	200	89,73

Penurunan konsentrasi pencemar setelah proses adsorpsi dengan zeolit terjadi karena struktur kristal tiga dimensi zeolit yang tersusun atas tetrahedral silikat memiliki saluran dan rongga yang memungkinkan terjadinya pertukaran ion, di mana kation dan molekul air bebas dapat menempati ruang tersebut. Karakteristik ini, ditambah dengan ukuran pori yang besar, luas permukaan yang tinggi, serta keberadaan sisi aktif, membuat zeolit efektif dalam mengadsorpsi ion. Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh aktivasi karbon aktif menggunakan H_2SO_4 dan zeolit dengan HCl, yang menambah gugus asam pada permukaan dan meningkatkan kemampuan pertukaran ion. Gugus fungsi asam tersebut dapat melepaskan ion H^+ ke dalam larutan sehingga menyebabkan penurunan pH. Mekanisme yang sama juga terjadi pada zeolit yang diaktivasi dengan HCl, di mana proses aktivasi menambah jumlah proton pada permukaan material. Selama proses adsorpsi berlangsung, proton dari zeolit akan bertukar dengan kation lain dalam limbah seperti Na^+ , Ca^{2+} , atau ion logam berat.

Sementara itu, penurunan intensitas warna disebabkan oleh kemampuan karbon aktif yang berpori untuk mengikat molekul zat warna. Semakin lama waktu kontak antara karbon aktif dan limbah, semakin besar jumlah polutan yang terjerap, sehingga ikatan kimia pewarna dapat terurai secara bertahap dan warna limbah menjadi semakin pudar. Zeolit turut meningkatkan efisiensi proses adsorpsi dengan bertindak sebagai penyaring ion, sehingga kombinasi kedua adsorben ini mampu menurunkan warna limbah batik hingga lebih jernih.

Karbon aktif berperan menyerap senyawa organik melalui pori mikronya, sementara zeolit memperkuat penyerapan logam melalui pertukaran kation. Kombinasi keduanya menciptakan mekanisme sinergis yang mampu menurunkan kadar bahan organik, warna, dan logam berat secara signifikan. Secara keseluruhan, metode adsorpsi dengan kombinasi karbon aktif dan zeolit efektif memperbaiki kualitas limbah cair batik, meskipun diperlukan tahap pengolahan lanjutan agar seluruh parameter memenuhi baku mutu sesuai Peraturan Menteri LHK No. P.16 Tahun 2019.

3.2. Aklimatisasi

Hasil pengamatan visual menunjukkan adanya perubahan kondisi morfologi *Scirpus grossus* selama proses fitoremediasi. Pada awal pengamatan, tanaman tampak segar dengan daun berwarna hijau. Mulai hari ke-6, sebagian daun mengalami perubahan warna menjadi kuning kecokelatan, kemudian pada hari ke-9 mulai terlihat gejala klorosis dan pengeringan batang. Kondisi tersebut semakin terlihat pada hari ke-12 hingga hari ke-16, ditandai dengan daun yang mengering serta sebagian akar dan batang mengalami pembusukan. Perubahan tersebut menunjukkan adanya respons fisiologis tanaman terhadap kondisi lingkungan dalam reaktor. Namun, karena penelitian ini tidak melakukan pengukuran biomassa, jumlah batang hidup, parameter fisiologis tanaman, maupun kandungan logam pada jaringan tanaman, perubahan morfologi tersebut belum dapat digunakan untuk memastikan tingkat stres toksik atau mekanisme akumulasi Cr^{6+} dalam jaringan tanaman. Dengan demikian, respons tanaman dalam penelitian ini diposisikan sebagai indikasi visual adanya penurunan kondisi fisiologis selama proses fitoremediasi.

Kematian tanaman diduga disebabkan oleh toksisitas limbah yang mengandung bahan organik logam berat, serta perubahan pH dan kadar oksigen terlarut yang mengganggu fungsi fisiologis akar. Selain itu, terbentuknya endapan lumpur halus (*sludge*) di dasar reaktor menunjukkan adanya pengendapan partikel tersuspensi dan logam berat di area perakaran. Volume *sludge* yang dihasilkan relatif sedikit dan tidak memengaruhi hasil analisis karena disaring sebelum pengujian.

3.3. Fitoremediasi

Proses fitoremediasi menunjukkan penurunan kadar COD, krom heksavalen, dan warna paling signifikan pada hari ke-12, menandakan berkurangnya senyawa organik akibat aktivitas tanaman dan mikroorganisme. Namun, pada hari ke-16 terjadi peningkatan pH dan warna karena kematian tanaman yang menyebabkan pelepasan pigmen ke air. Nilai pH selama pengolahan berkisar antara 6,7–7,4, menunjukkan kondisi netral yang mendukung aktivitas mikroba dan metabolisme tanaman dalam menyerap logam serta senyawa organik. Suhu air selama penelitian relatif stabil pada kisaran 27–29°C, sesuai dengan suhu optimal bagi proses fitoremediasi.

Tabel 4. Hasil Analisis Pengaruh Waktu Tinggal Fitoremediasi Tanaman Mensiang

Perlakuan	pH	Suhu (°C)	COD (mg/L)	Krom heksavalen (mg/L)	Warna (Pt-Co)
F0	6,58	32,2	574,3	0,6	363
F1	7,20	27,73	367,3	< 0,001	328,3
F2	7,41	27,60	368,7	< 0,001	400

Konsentrasi Cr^{6+} menurun dari 0,6 mg/L menjadi <0,001 mg/L setelah proses fitoremediasi dengan

efisiensi penyisihan >99%. Penurunan konsentrasi Cr^{6+} menunjukkan adanya penyisihan kromium selama proses fitoremediasi.

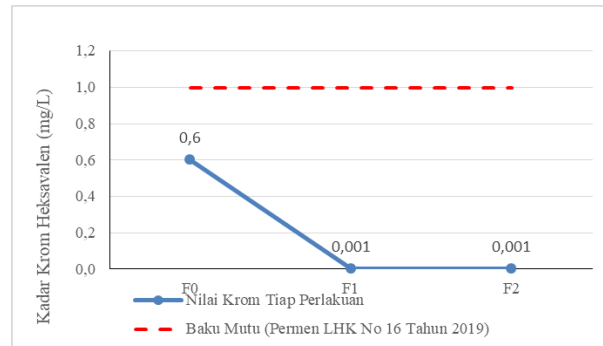
Kadar warna juga mengalami penurunan dari 362,7 Pt-Co menjadi 246,5 Pt-Co pada hari ke-12, yang disebabkan oleh proses degradasi senyawa organik oleh mikroorganisme di zona akar (rizodegradasi).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hari ke-12 merupakan waktu pengamatan dengan hasil terbaik, sedangkan pada hari ke-16 terjadi peningkatan kembali pada beberapa parameter. COD meningkat dari 367,3 mg/L pada hari ke-12 menjadi 368,7 mg/L pada hari ke-16, sedangkan warna meningkat dari 328,3 Pt-Co menjadi 400 Pt-Co. Peningkatan tersebut bertepatan dengan kondisi tanaman yang mulai mengalami pengeringan dan pembusukan. Kondisi ini diduga dapat menyebabkan pelepasan bahan organik dan pigmen dari jaringan tanaman ke dalam media air sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kembali COD dan warna. Namun, karena penelitian ini tidak mengukur secara langsung jumlah bahan organik atau pigmen yang dilepaskan dari biomassa tanaman, hubungan tersebut perlu dipandang sebagai dugaan berdasarkan kesesuaian antara perubahan kualitas air dan kondisi visual tanaman. Temuan ini memiliki implikasi operasional penting, karena penggunaan tanaman dalam sistem fitoremediasi perlu mempertimbangkan kondisi fisiologis tanaman dan waktu penggantian biomassa. Dalam penerapannya, tanaman dapat dipanen atau diganti sebelum mengalami pembusukan yang berpotensi menurunkan kembali kualitas efluen.

Berdasarkan Tabel 4, nilai pH air limbah mengalami fluktuasi selama proses fitoremediasi. Terjadi peningkatan pH sebesar 0,8 pada hari pertama hingga kedua, kemudian sedikit penurunan pada hari ke-8 dan ke-9. Secara keseluruhan, pH meningkat dari 6,7 pada hari pertama menjadi 7,4 pada hari ke-16, yang masih berada dalam kisaran optimal (6,7–8,5) bagi pertumbuhan tanaman air. Sebelum pengolahan, limbah batik Cisadane memiliki pH tinggi (10,15), namun setelah perlakuan nilainya menurun hingga sesuai baku mutu limbah tekstil. Perubahan pH ini diduga akibat aktivitas penyerapan nutrisi oleh *Scirpus grossus*, di mana logam Cr^{6+} yang terurai dimanfaatkan tanaman sebagai nutrisi, sementara pelepasan CO_2 dari proses metabolisme turut menstabilkan pH media.

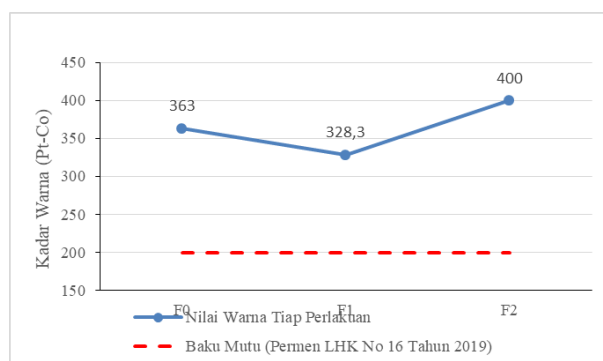
Suhu air limbah selama proses fitoremediasi berkisar antara 27,6–27,73°C pada hari ke-12 hingga ke-16, masih dalam kisaran normal dan seimbang dengan suhu udara (31–33°C). Perbedaan kecil ini dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari saat pengukuran sekitar pukul 10 pagi. Suhu yang moderat (27–28°C) terbukti mendukung efektivitas penurunan COD karena meningkatkan aktivitas metabolik tanaman *Scirpus grossus* dan enzim yang berperan dalam proses *rizofiltrasi*. Sebaliknya, suhu tinggi (sekitar 32°C) dapat menurunkan kemampuan tanaman dalam menyerap senyawa organik. Selain itu, kenaikan suhu dapat mengurangi kadar oksigen

terlarut sehingga memicu pengendapan logam berat di dasar media. Suhu juga mempengaruhi aktivitas mikroba serta laju difusi ion logam berat ke akar, yang berperan penting dalam proses penyerapan dan degradasi pencemar (Soheti et al., 2020).



Gambar 2. Grafik Konsentrasi Krom pada Fitoremediasi

Berdasarkan Gambar 2, kadar krom heksavalen (Cr^{6+}) dalam limbah cair batik menurun signifikan dari 0,6 mg/L menjadi 0,001 mg/L, menunjukkan efisiensi penurunan lebih dari 99% dalam 16 hari. Penurunan ini terjadi karena kemampuan tanaman *Scirpus grossus* (Mensiang) dalam menyerap dan mengakumulasi logam melalui proses *rizofiltrasi*, yaitu pengendapan dan penyerapan logam berat oleh akar. Akar berperan penting karena kontak langsung dengan media limbah, memungkinkan ion logam diserap dan ditranslokasikan ke batang serta daun melalui jaringan xilem (Noor dkk, 2020). Efektivitas *Scirpus grossus* ini lebih tinggi dibandingkan penelitian serupa menggunakan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), yang hanya mencapai efisiensi 97,1%, menunjukkan bahwa tanaman Mensiang memiliki kapasitas akumulasi logam berat dan kemampuan translokasi yang lebih baik (Karthikeyan & George, 2019).

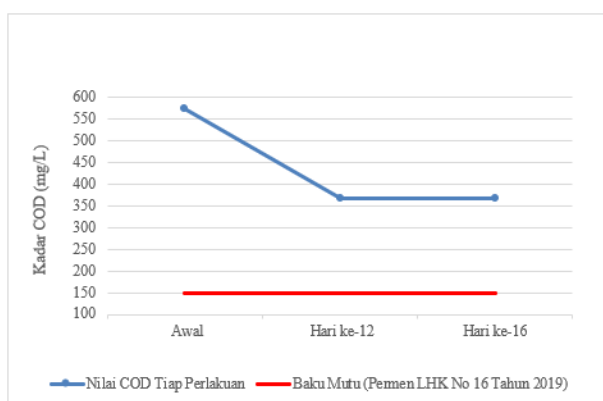


Gambar 3. Grafik Konsentrasi Warna pada Fitoremediasi

Berdasarkan Gambar 3, kadar warna limbah cair batik menurun dari 362,7 Pt-Co menjadi 246,5 Pt-Co, menunjukkan adanya proses degradasi senyawa pewarna melalui kombinasi adsorpsi dan fitoremediasi. Penurunan ini disebabkan oleh proses *rizodegradasi*, yaitu penguraian senyawa organik berwarna oleh mikroorganisme di zona akar serta penyerapan dan sedimentasi pada media tanam.

Pewarna sintetis seperti remazol black, red, dan golden yellow yang sulit terurai di alam turut berkontribusi terhadap tingginya COD pada limbah batik (Apriyani, 2018).

Jika dibandingkan dengan tanaman lain, seperti bambu air yang mampu menurunkan zat warna sintetis hingga lebih dari 96%, tanaman *Scirpus grossus* (Mensiang) hanya menurunkan warna sebesar 9,64% hingga hari ke-12 dan mengalami peningkatan kembali pada hari ke-16 akibat pembusukan tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa struktur akar dan ketahanan tanaman menjadi faktor penting dalam efektivitas fitoremediasi warna limbah batik (Raissa dkk, 2017).



Gambar 4. Grafik Konsentrasi COD pada Fitoremediasi

Nilai COD menggambarkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan bahan organik secara kimiawi dalam air. Berdasarkan hasil penelitian, konsentrasi COD limbah batik menurun sebesar 36% dari hari ke-1 hingga hari ke-12, menunjukkan adanya penyisihan bahan organik yang kemungkinan melibatkan aktivitas mikroorganisme di sekitar zona perakaran dan aktivitas fisiologis tanaman serta peran mikroorganisme di sekitar akar dalam mendegradasi bahan organik (Dwi dkk, 2015).

Tabel 5. Kesesuaian Hasil Pengolahan Limbah Cair Batik dengan Baku Mutu Air Limbah Tekstil

Parameter	A0	A1	Baku Mutu *	Keterangan
COD (mg/L)	11.971	368,7	150	Tidak Memenuhi
Cr ⁶⁺ (mg/L)	2,3	< 0,001	1	Memenuhi
Warna (Pt-Co)	3.416	400	200	Tidak Memenuhi

Keterangan:

A0 = Sampel Awal Limbah

A1 = Sampel Akhir (Setelah Proses Fitoremediasi selama 16 hari)

* Baku Mutu Limbah Tekstil Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/Menlhk/Setjen/Kum1/4/2019

Hasil pengolahan limbah cair batik dengan kombinasi metode adsorpsi (menggunakan karbon aktif dan zeolit) serta fitoremediasi oleh tanaman *Scirpus grossus* (Mensiang) menunjukkan penurunan signifikan pada parameter COD, Cr⁶⁺, dan warna. Konsentrasi Cr⁶⁺ berhasil diturunkan dari 2,3 mg/L

menjadi <0,001 mg/L, jauh di bawah baku mutu 1 mg/L, menunjukkan efektivitas tinggi dalam penghilangan logam berat melalui proses penyerapan dan rhizofiltrasi. Nilai COD menurun dari 11.971 mg/L menjadi 368,7 mg/L dengan efisiensi lebih dari 96%, namun hasil akhir masih di atas batas baku mutu 150 mg/L, menandakan perlunya pengolahan lanjutan untuk degradasi bahan organik tersisa. Parameter warna juga mengalami penurunan dari 3.416 Pt-Co menjadi 400 Pt-Co (efisiensi 88%), tetapi nilai akhir belum memenuhi standar 200 Pt-Co, kemungkinan akibat pembusukan tanaman pada hari ke-16 yang melepaskan pigmen ke air. Secara keseluruhan, kombinasi adsorpsi dan fitoremediasi efektif memperbaiki kualitas limbah, terutama dalam menghilangkan logam berat, namun perlu optimasi lebih lanjut—seperti pengaturan waktu tinggal dan peningkatan kapasitas media—agar parameter COD dan warna dapat sepenuhnya memenuhi baku mutu.

Hasil uji statistik *Paired Sample t-Test* menunjukkan bahwa nilai penurunan untuk parameter COD, Cr⁶⁺, dan warna masing-masing bernilai <0,05 (COD = 0,000; Cr⁶⁺ < 0,001; warna < 0,001). Hal ini berarti hipotesis alternatif (H₁) diterima dan hipotesis nol (H₀) ditolak. Dengan demikian, kombinasi metode adsorpsi (karbon aktif dan zeolit) serta fitoremediasi menggunakan tanaman *Scirpus grossus* (Mensiang) terbukti berpengaruh terhadap penurunan kadar COD, Cr⁶⁺, dan warna limbah cair batik. Hasil ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi dan fitoremediasi mampu bekerja secara sinergis dalam menguraikan bahan organik, logam berat, serta zat pewarna sintetis secara efektif.

3.4. Perbandingan Kinerja dengan Penelitian Sejenis

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi karbon aktif dan zeolit memiliki efisiensi penurunan COD yang lebih tinggi dibandingkan penelitian Syafalni dkk. (2012), yang melaporkan efisiensi sebesar 59,46% menggunakan sistem batch dengan konfigurasi lapisan GAC dan zeolit. Pada penelitian ini, konsentrasi COD pada sampel limbah yang diambil dari bak penampungan akhir tercatat sebesar 11.971 mg/L, kemudian menurun menjadi 574,3 mg/L dengan efisiensi mencapai 95,2%. Hasil ini menunjukkan kinerja adsorpsi yang efektif pada kondisi sampel dengan beban pencemar tinggi.

Untuk parameter Cr⁶⁺, kombinasi karbon aktif-zeolit dalam penelitian ini mampu menurunkan konsentrasi dari 2,3 mg/L menjadi 0,6 mg/L dengan efisiensi sebesar 74% dan telah memenuhi baku mutu. Nilai ini sebanding dengan penelitian Chamidah dkk. (2023) yang melaporkan efisiensi penurunan Cr⁶⁺ sebesar 74,63% menggunakan zeolit, meskipun hasil akhirnya belum memenuhi baku mutu akibat konsentrasi awal yang jauh lebih tinggi. Namun demikian, penggunaan koagulan PAC pada penelitian tersebut menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi (90,15%), menunjukkan bahwa proses koagulasi masih lebih unggul dalam penyisihan kromium

dibandingkan adsorpsi mineral tunggal maupun kombinasinya.

Pada tahap fitoremediasi, tanaman *Scirpus grossus* menunjukkan efektivitas yang sangat tinggi dalam menurunkan Cr^{6+} , dengan efisiensi lebih dari 99% dalam waktu 16 hari. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan penelitian (Nugroho, 2021) yang menggunakan *Eichhornia crassipes*, dengan efisiensi maksimum sebesar 97,1%. Namun, kedua penelitian menunjukkan keterbatasan biologis serupa, di mana efektivitas jangka menengah dibatasi oleh kerusakan jaringan tanaman akibat paparan logam berat.

Sebaliknya, untuk parameter warna dan COD, kinerja *Scirpus grossus* relatif lebih rendah dibandingkan tanaman air lain. Penelitian terdahulu melaporkan bahwa *Eichhornia crassipes* dan bambu air mampu menurunkan zat warna hingga lebih dari 90% serta COD hingga sekitar 60% dalam waktu kurang dari dua minggu. Pada penelitian ini, penurunan warna oleh *Scirpus grossus* hanya mencapai sekitar 9,6% pada hari ke-12 dan mengalami peningkatan kembali pada hari ke-16 akibat pembusukan tanaman. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa efektivitas fitoremediasi sangat dipengaruhi oleh morfologi akar, laju pertumbuhan, serta kemampuan metabolik tanaman dalam mengasimilasi dan menguraikan senyawa organik kompleks.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa kinerja sistem adsorpsi-fitoremediasi sangat bergantung pada karakteristik pencemar dan respons biologis tanaman, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut mengenai implikasi mekanisme dan batasan operasional sistem.

3.5. Implikasi Mekanisme dan Batasan Sistem

Berdasarkan hasil akhir pengolahan, kombinasi adsorpsi-fitoremediasi belum mampu menghasilkan effluen yang memenuhi seluruh baku mutu. Cr^{6+} telah memenuhi baku mutu, sedangkan COD dan warna masih berada di atas batas yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, sistem ini lebih realistis ditempatkan sebagai unit pra-pengolahan atau pengolahan antara dalam rangkaian instalasi pengolahan air limbah (IPAL), bukan sebagai unit pengolahan akhir. Tahap adsorpsi berperan penting dalam menurunkan beban pencemar awal, sedangkan fitoremediasi menggunakan *Scirpus grossus* dapat digunakan sebagai tahap lanjutan untuk mempertahankan atau meningkatkan penyisihan pencemar tertentu, terutama Cr^{6+} . Effluen hasil proses selanjutnya dapat dikombinasikan dengan unit pengolahan lanjutan, seperti proses biologis untuk penguraian bahan organik atau proses fisik-kimia untuk penyisihan warna, sebelum dibuang ke lingkungan. Pemilihan unit lanjutan perlu disesuaikan dengan karakteristik effluen dan target baku mutu yang ingin dicapai.

4. KESIMPULAN

Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit serta

fitoremediasi menggunakan *Scirpus grossus* mampu menurunkan konsentrasi COD, Cr^{6+} , dan warna pada limbah cair batik. Pada tahap adsorpsi, penurunan terbesar terjadi pada COD dan warna, masing-masing sebesar 95,2% dan 89,73%, sedangkan Cr^{6+} menurun sebesar 74%. Tahap fitoremediasi selanjutnya memberikan penyisihan tambahan, terutama terhadap Cr^{6+} , dengan konsentrasi menurun dari 0,6 mg/L menjadi <0,001 mg/L. Hasil pengamatan fitoremediasi menunjukkan kondisi dengan hasil terbaik pada hari ke-12, sedangkan pada hari ke-16 terjadi sedikit peningkatan COD dan warna.

Secara keseluruhan, kombinasi kedua tahap pengolahan mampu menurunkan COD dari 11.971 mg/L menjadi 368,7 mg/L, Cr^{6+} dari 2,3 mg/L menjadi <0,001 mg/L, dan warna dari 3.416 Pt-Co menjadi 400 Pt-Co. Cr^{6+} telah memenuhi baku mutu, sedangkan COD dan warna masih berada di atas baku mutu sehingga diperlukan pengolahan lanjutan. Berdasarkan hasil penelitian, adsorpsi memberikan kontribusi utama terhadap penyisihan COD dan warna, sedangkan tahap fitoremediasi memberikan penyisihan lanjutan terutama terhadap Cr^{6+} .

Kinerja sistem dalam penelitian ini tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan adanya efek sinergis antara adsorpsi dan fitoremediasi karena kontribusi masing-masing proses belum diuji menggunakan kelompok kontrol yang memungkinkan pemisahan efek secara eksperimental. Demikian pula, hasil analisis statistik diinterpretasikan secara hati-hati mengingat jumlah replikasi perlakuan yang terbatas. Oleh karena itu, sistem kombinasi adsorpsi-fitoremediasi lebih tepat dipertimbangkan sebagai tahap pra-pengolahan atau pengolahan antara yang masih memerlukan proses lanjutan untuk mencapai seluruh baku mutu limbah cair tekstil.

DAFTAR PUSTAKA

- Noor, I., P. B., F. and Kissinger. (2020). Pemberian Arang Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Penyerapan Logam Berat Kadmium (Cd) dan Tembaga (Cu) Pada Air Asam Tambang. *EnviraScientiae*, 16(2), 216–224.
- Raissa, D. G., & Tangahu, B. V. (2017). Jurnal Teknik ITS. *Raissa, D. G. & Tangahu, B. V.*, 6(2), 7–11.
- Apriyani, N. (2018). Industri Batik: Kandungan Limbah Cair dan Metode Pengolahannya. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 3(1), 21–29. <https://doi.org/10.33084/mitl.v3i1.640>
- Azwari, F., & Triyono, J. (n.d.). *Fitoremediasi Logam Fe dalam Air Asam Tambang Menggunakan Eceng Gondok (Eichhornia Crassipes) Fitoremediation of Heavy Metal Fe in Mining Acid Water with Water Hyacinth (Eichhornia crassipes)*.
- Dwi Adhi Suastuti, N., Suarsa, I., & Kurnia Putra R, D. (2015). JURNAL KIMIA. *Dwi Adhi Suastuti, N., Suarsa, I., & Kurnia Putra R, D.*, 9(1), 98–104.
- Karthikeyan, P. G., & George, S. (2019). Heavy metal removal by greater club rush (*Scirpus grossus*) vs water hyacinth in a wetland ecosystem. *Indian Journal of Weed Science*, 51(3), 280. <https://doi.org/10.5958/0974-8164.2019.00059.5>

- Apriani, I., Lith, M. P. A., dan Arifin. (2026). Evaluasi Kinerja dan Keterbatasan *Scippus grossus* pada Adsorpsi-Fitoremediasi Limbah Cair Industri Batik Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(4), 1034-1041, doi:10.14710/jil.24.4. 1034-1041
- Maria, E. (2019). Penyisihan COD Limbah Cair Industri Batik Dengan Metode Fitoremediasi Pada SSF-Wetland Menggunakan Tanaman Obor (*Typha Latifolia*) dan Tanaman Tasbih (*Canna Indica.L*) (Vol. 19, Issue 1).
- Nugroho, P. A. (2021). *Nugroho, P. A. (2021) Efektivitas Eceng Gondok Sebagai Fitoremediator Logam Krom Heksavalen Pada Limbah Cair Industri Batik di Yogyakarta.*
- Soheti, P., Sumarlin, L. O., & Marisi, D. P. (2020). Fitoremediasi Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Kayu Apu (*Pistia stratiotes*) Untuk Menurunkan Kadar Torium. *EKSPLORIUM*, 41(2), 139. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2020.41.2.6092>
- Sulaksono, A., Effendi, H., & Kurniawan, B. (2015). Kajian Beban Pencemaran Limbah Cair Industri kecil Menengah (IKM) Batik Klaster Trusmi kabupaten Cirebon (Study on Wastewater Pollution Load from Batik Small Medium Enterprises (SMEs) In Trusmi Cluster, Cirebon District). In *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan* (Vol. 5, Issue 1).
- Suryani, E. (2014). *Phytoremediation of synthetic dyes using Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Management*, 144, 72–78.
- Syafalni, S., Abustan, I., Zakaria, M., et al. (2012). *Application of granular activated carbon (GAC) and zeolite in wastewater treatment: column study*. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(1), 201–207.
- Widiyanto, A. (2022). *Efficiency of aquatic plants in the removal of industrial dye wastewater*. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102787.
- Handayani, W., Suwarno, D., & Widianarko, B. (2025). *The Potential of Adsorption Technology for Batik Wastewater Treatment: A Review*. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 15(5), 864. DOI: 10.29244/jpsl.15.5.864.