

Pengaruh ZnO-Karbon Aktif Terhadap Penurunan Cr(VI) Pada Air Limbah Batik Dengan Metode Fotokatalisis Iradiasi Sinar Tampak

Farhan Auladana Putra Anhar*, Mohamad Mirwan, Muhammad Abdus Salam Jawwad,
Srie Muljani

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 21034010080@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 8 Februari 2026

Disetujui: 14 Februari 2026

Abstract

The batik industry generates wastewater containing the heavy metal hexavalent chromium Cr(VI), which is toxic, carcinogenic, and harmful to aquatic environments. One potentially effective and environmentally friendly method to reduce Cr(VI) levels is photocatalysis. This study aims to analyze the effect of using a ZnO-activated carbon composite and catalyst mass on photocatalytic performance under visible light irradiation for the removal of Cr(VI) from batik wastewater. The variations applied include catalyst masses of 30 gram, 45 gram, and 60 gram. The results show that the ZnO-activated carbon composite improves the efficiency of Cr(VI) reduction compared to unmodified ZnO. The optimal condition was achieved using the ZnO-activated carbon composite with the highest catalyst mass and the longest contact time, resulting in a removal efficiency of 39%.

Keyword : batik wastewater, cr(vi), photocatalysis, zno, activated carbon, visible light

Abstrak

Industri batik menghasilkan air limbah yang di dalamnya terkandung logam berat kromium heksavalen Cr(VI) dengan sifat toksik, karsinogenik, dan berbahaya bagi lingkungan perairan. Salah satu metode yang berpotensi efektif dan ramah lingkungan untuk menurunkan kadar Cr(VI) adalah fotokatalisis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan komposit ZnO-karbon aktif dan massa katalis terhadap kinerja fotokatalisis dengan iradiasi sinar tampak dalam menurunkan kadar Cr(VI) pada air limbah batik. Variasi yang digunakan meliputi massa katalis sebesar 30 gram, 45 gram, dan 60 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan komposit ZnO-karbon aktif mampu meningkatkan efisiensi penurunan Cr(VI) dibandingkan ZnO tanpa modifikasi. Kombinasi kondisi optimal diperoleh pada penggunaan komposit ZnO - karbon aktif dengan massa terbesar dan waktu kontak terlama dengan efisiensi penyisihan sebesar 39%.

Kata Kunci : air limbah batik, cr(vi), fotokatalisis, zno, karbon aktif, sinar tampak

1. Pendahuluan

Batik merupakan satu dari banyak budaya sekaligus ciri khas bangsa Indonesia yang sudah dikenal dunia. Industri batik nasional terus berkembang seiring dengan peminat batik yang semakin banyak. Di dalam proses produksi batik, digunakan berbagai macam bahan baku zat pewarna yang mengandung zat kimia. Zat warna yang digunakan seperti naftol, indigosol, dan remazol black, red dan golden yellow [1]. Selain menggunakan zat pewarna, industri batik juga menggunakan bahan kimia dengan kandungan *Total Suspended Solid* (TSS), zat organik, dan anorganik dengan kandungan logam berat [2].

Berbagai macam proses dilakukan dalam memproduksi kain batik, antara lain pelepasan lilin, pencucian, perendaman, dan pembilasan. Air limbah yang dihasilkan dari proses ini mengandung zat pewarna yang di dalamnya juga terdapat logam berat. Logam berat dengan kandungan tertinggi yang berada di dalam zat pewarna adalah kromium. Kromium dapat mencemari lingkungan melalui air, tanah, dan udara. Zat pencemar yang sudah masuk ke dalam air sungai akan menyebabkan pencemaran air dan dapat terserap ke tanah hingga masuk ke dalam sumber air sumur. [3]. Oleh karena itu, pengolahan limbah batik, khususnya dalam hal penurunan kandungan logam berat, menjadi hal yang sangat penting.

Metode yang banyak dikembangkan untuk mengurangi kandungan kromium adalah fotokatalisis. Fotokatalisis adalah reaksi kimia yang terjadi antara sinar dan katalis dengan bantuan energi foton. Pada prosesnya, fotokatalisis membutuhkan katalis seperti CuO, ZnS, TiO₂, dan ZnO karena bersifat semikonduktor. Sebagian semikonduktor memiliki celah pita yang cukup yang digunakan dalam proses fotokatalis, seperti ZnO (energi celahh = 3,4 eV); TiO₂ (energi celahh = 3,2 eV) ; dan lain-lain. Beberapa

semikonduktor memiliki celah pita yang cukup untuk digunakan dalam proses fotokatalisis. ZnO digunakan untuk menggantikan TiO₂ karena keduanya memiliki mekanisme fotokatalisis yang kurang lebih sama. [4].

Seng oksida (ZnO) merupakan material semikonduktor yang sudah banyak digunakan karena efisiensinya dalam proses fotokatalisis. Seng oksida (ZnO) memiliki beberapa kelebihan seperti stabilitas kimia yang baik, kinerja fotokatalitik yang tinggi, dan biaya yang relatif murah. ZnO mampu mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) yang lebih stabil dan toksik yang jauh lebih rendah. Tetapi ZnO memiliki kekurangan untuk menyerap zat yang akan direduksi dalam fotokatalisis. sehingga perlu dilakukan modifikasi untuk memperluas permukaan katalis. Untuk meningkatkan performa fotokatalitik ZnO, modifikasi ZnO dengan karbon aktif dapat menjadi salah satu alternatif modifikasi sebagai penyangga karena memiliki luas area permukaan yang spesifik dengan struktur berpori sehingga diharapkan dapat meningkatkan daya adsorpsi dan aktivitas fotokatalitik ZnO [5].

Kombinasi ZnO-karbon aktif diharapkan dapat menciptakan sistem fotokatalis yang lebih efisien dalam menyisihkan logam berat dari limbah cair. Kombinasi ZnO dan karbon aktif ini akan membuat kemampuan fotokatalitik dari ZnO meningkat karena mudah terdispersi ke dalam pori karbon aktif [6]. Material ini tidak hanya berperan dalam proses fotokatalisis, tetapi juga menyediakan situs aktif untuk adsorpsi Cr(VI), sehingga mendukung proses pengolahan limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan efisiensi penyisihan fotokatalis ZnO-karbon aktif dalam menyisihkan logam berat Cr(VI), serta memahami pengaruh ZnO-karbon aktif terhadap peningkatan efisiensi degradasi Cr(VI) di bawah sinar tampak.

2. Metode Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan reaktor tipe kontinu dengan bahan utama pipa berbahan akrilik sebagai tubuh alat atau reaktor berbentuk kolom silinder. Peralatan yang digunakan antara lain adalah neraca analitik, lampu UV-C, lampu LED, beaker glass, magnetic stirrer, oven, furnace, pipa, dan glass tube. Sedangkan untuk bahan yang digunakan adalah serbuk katalis ZnO, karbon aktif, aquades, dan NaOH.

2.2 Aktivasi Karbon Aktif

Tambahkan 50 gram serbuk karbon aktif ke dalam larutan NaOH 1M. Selama empat jam, larutan diaduk dengan pengaduk magnetik dengan dipanaskan pada suhu 85°C. Setelah larutan disaring, gunakan air destilasi untuk membersihkan karbon aktif hingga pH netral. Setelah residu kering, oven digunakan pada suhu 110 °C selama satu jam dan kemudian dikalsinasi pada suhu 600 °C selama satu jam untuk menghasilkan karbon aktif [5].

2.3 Preparasi ZnO-Karbon Aktif

Menyiapkan aquades, katalis ZnO, dan karbon aktif. Sebanyak 1000 ml aquades dimasukkan ke dalam beaker glass. Kemudian ditambahkan katalis ZnO dan karbon aktif dengan perbandingan 1:1. Larutan diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 3 hari dalam kondisi gelap agar katalis dan karbon aktif tercampur sempurna. Komposit katalis dan karbon aktif kemudian disaring dan dikeringkan [7].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Awal Air Limbah

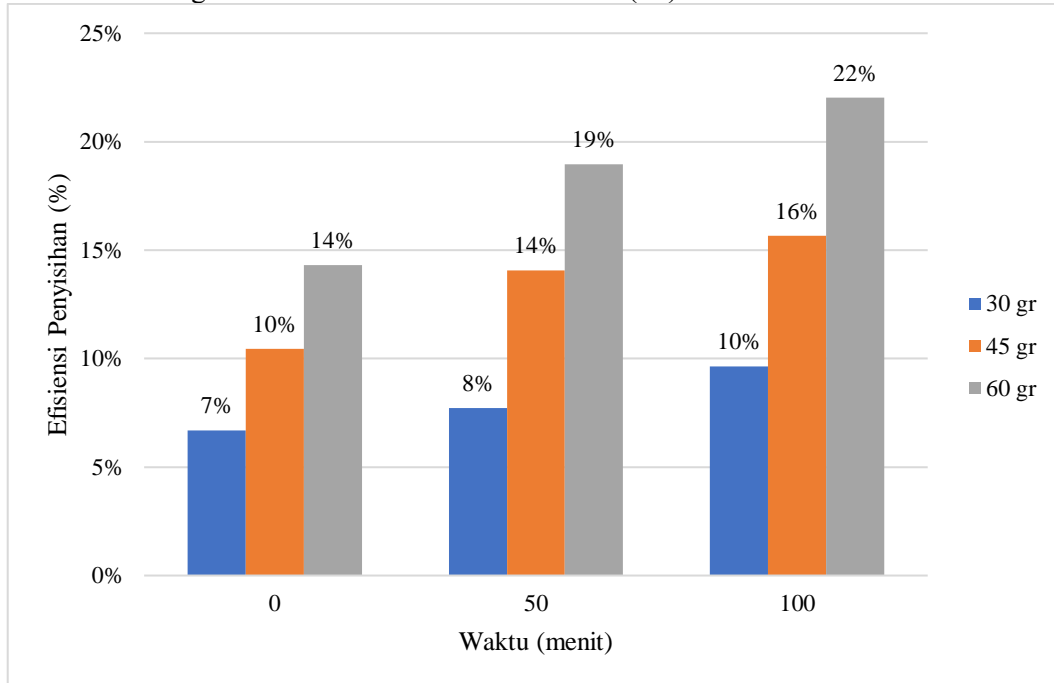
Karakteristik awal air limbah batik perlu diketahui sebelum dilakukan proses fotokatalisis untuk menentukan kondisi awal kandungan polutan yang terdapat di dalamnya. Pengujian karakteristik ini meliputi konsentrasi awal logam berat kromium heksavalen Cr(VI). Data tersebut menjadi acuan dalam menilai efektivitas proses fotokatalitik menggunakan fotokatalis ZnO–karbon aktif dengan iradiasi sinar tampak

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa air limbah batik yang digunakan berwarna gelap pekat. Kandungan Cr(VI) awal pada limbah terdeteksi sebesar 8,81 mg/L, yang melebihi ambang batas baku mutu limbah cair industri tekstil menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014, yaitu 0,1 mg/L. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa air limbah batik masih mengandung logam berat beracun yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan benar.

3.2 Pembahasan

Penelitian ini membahas kinerja fotokatalis ZnO dan komposit ZnO–karbon aktif dalam menurunkan konsentrasi Cr(VI) pada air limbah batik di bawah iradiasi sinar tampak. Pada penelitian ini digunakan modifikasi ZnO dengan karbon aktif untuk proses fotokatalisis. Modifikasi ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja ZnO dalam fotokatalisis di bawah sinar tampak. Pembahasan difokuskan pada

perbandingan efektivitas kedua material dalam menurunkan Cr(VI). Penelitian diawali dengan evaluasi kinerja ZnO murni sebagai fotokatalis dalam menurunkan Cr(VI).



Gambar 1. Grafik Efisiensi Penyisihan ZnO

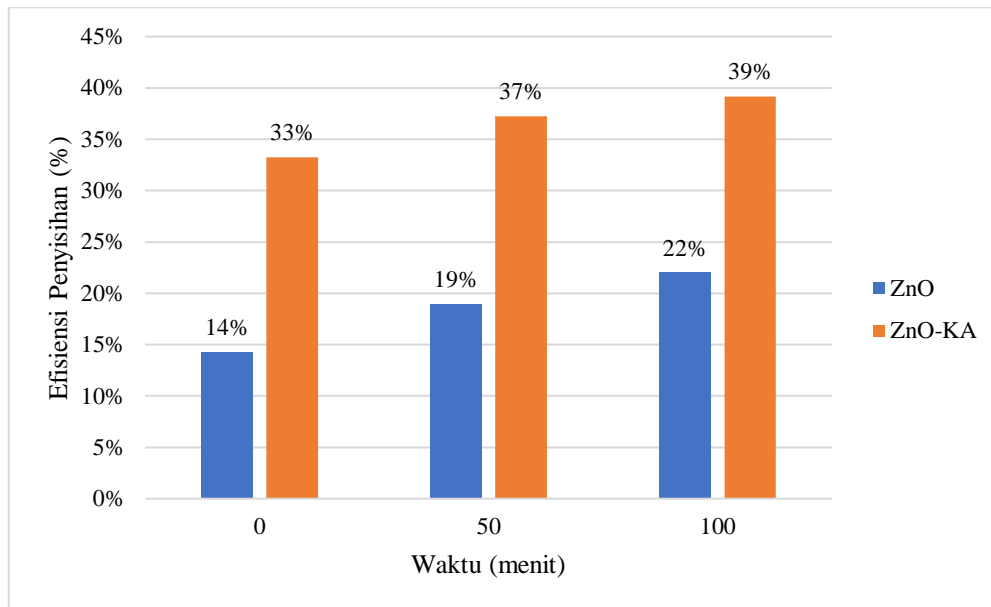
Penggunaan ZnO tanpa modifikasi sebagai fotokatalis menunjukkan kemampuan dalam menurunkan konsentrasi Cr(VI) pada air limbah batik di bawah iradiasi sinar tampak, meskipun efisiensinya relatif terbatas. ZnO hanya mampu menyisihkan 22% Cr(VI) dengan massa katalis 60 gram dalam 100 menit. Aktivitas fotokatalitik ZnO terjadi ketika material ini menyerap energi cahaya dan menghasilkan pasangan *electron-hole* (e^-/h^+). Elektron yang terbentuk pada pita konduksi dapat berperan dalam proses reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). Keterbatasan utama ZnO murni terletak pada respon spektrum cahayanya yang dominan pada wilayah sinar ultraviolet. Di bawah iradiasi sinar tampak, energi foton yang diterima sering kali tidak cukup untuk mengaktifkan permukaan ZnO secara optimal [8]. Selain itu, tingginya laju rekombinasi pasangan elektron-hole pada ZnO menyebabkan jumlah muatan yang dapat berpartisipasi dalam reaksi fotokatalitik menjadi berkurang, sehingga efisiensi penurunan Cr(VI) menjadi kurang maksimal [9].

Pengaruh Modifikasi ZnO dengan Karbon Aktif

Pada penelitian ini, digunakan modifikasi ZnO dengan penambahan karbon aktif bertujuan untuk meningkatkan kinerja fotokatalitik dalam mereduksi kadar Cr(VI). Pada dasarnya, ZnO memiliki kemampuan fotokatalitik yang baik di bawah penyinaran ultraviolet karena energi celah pita (band gap) yang sesuai untuk eksitasi elektron. Modifikasi ZnO dengan karbon aktif diharapkan dapat meningkatkan efisiensi proses fotokatalisis. Hasil penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan komposit ZnO-karbon aktif massa 60 gram menghasilkan efisiensi penurunan Cr(VI) yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan ZnO tanpa modifikasi. Peningkatan kinerja ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara ZnO sebagai fotokatalis dan karbon aktif sebagai material pendukung. Modifikasi ZnO dengan karbon aktif (ZnO-KA) terbukti memberikan peningkatan signifikan terhadap kinerja fotokatalisis dalam menurunkan konsentrasi Cr(VI). Dapat dilihat bahwa persentase penyisihan Cr(VI) oleh ZnO-karbon aktif selalu lebih tinggi dibandingkan ZnO tanpa modifikasi, baik di bawah di bawah penyinaran sinar tampak. Hal ini menunjukkan bahwa kehadiran karbon aktif memberikan kontribusi positif terhadap aktivitas fotokatalitik.

Efisiensi penyisihan Cr(VI) pada kedua sistem mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu reaksi, baik pada penggunaan ZnO maupun ZnO-karbon aktif. Efisiensi tertinggi berada pada menit ke-100, yaitu sebesar 22% untuk ZnO dan 39% untuk ZnO-karbon aktif. Kinerja ZnO-karbon aktif yang lebih unggul, menunjukkan bahwa karbon aktif tidak hanya berfungsi sebagai adsorben, tetapi juga berperan dalam meningkatkan efisiensi fotokatalisis dengan menekan rekombinasi *electron-hole* serta meningkatkan ketersediaan situs aktif reaksi.



Gambar 2. Grafik Perbandingan ZnO dan ZnO-Karbon Aktif

Peran karbon aktif dalam meningkatkan performa ZnO berkaitan dengan beberapa faktor. Karbon aktif memiliki luas permukaan yang sangat besar dan struktur pori yang kompleks, sehingga memberikan kapasitas adsorpsi awal yang tinggi terhadap ion Cr(VI). Adsorpsi awal ini penting karena memperbesar peluang kontak antara polutan dan permukaan ZnO, sehingga proses fotokatalisis dapat berlangsung lebih cepat dan lebih efisien. Dengan kata lain, karbon aktif membantu menangkap ion Cr(VI) lebih dekat ke situs aktif katalis. Karbon aktif juga berfungsi sebagai *electron reservoir* atau penangkap elektron. Dalam mekanisme fotokatalisis, salah satu hambatan terbesar adalah rekombinasi cepat antara elektron (e^-) dan hole (h^+) yang terbentuk setelah ZnO tereksitasi oleh cahaya. Rekombinasi ini mengurangi jumlah elektron yang dapat bereaksi dengan Cr(VI). Keberadaan karbon aktif memungkinkan elektron berpindah dari pita konduksi ZnO ke permukaan karbon aktif, sehingga memperlambat rekombinasi dan meningkatkan umur elektron. Elektron tersebut kemudian dapat digunakan secara lebih efektif untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III), yang memiliki toksisitas jauh lebih rendah. [10].

Modifikasi ZnO dengan karbon aktif tetap mampu meningkatkan respons ZnO terhadap cahaya tampak melalui mekanisme peningkatan transfer elektron [11]. ZnO-karbon aktif tampak secara konsisten menghasilkan penyisihan yang lebih tinggi dibandingkan ZnO murni pada setiap massa katalis. Hal ini menggambarkan bahwa modifikasi karbon aktif tidak hanya meningkatkan performa fotokatalitik berbasis energi tinggi, tetapi juga mendukung aktivitas katalis pada kondisi pencahayaan yang lebih rendah.

Modifikasi dengan karbon aktif juga meningkatkan dispersi partikel ZnO. Tanpa karbon aktif, partikel ZnO cenderung mudah menempel sehingga mengurangi luas area aktif fotokatalitik. Dengan adanya karbon aktif sebagai penyangga, partikel ZnO lebih tersebar merata di permukaan karbon aktif sehingga meningkatkan area situs aktif dan pergerakan zat pencemar menuju permukaan katalis menjadi lebih merata [12].

Dengan penggunaan sinar tampak, peningkatan persen removal Cr(VI) tetap terjadi. Hal ini dikarenakan energi foton sinar tampak tidak cukup untuk mengaktifkan ZnO secara optimal, mengingat band gap ZnO yang lebih sesuai dengan sinar ultraviolet [13]. Aktivasi yang terjadi pada sinar tampak umumnya lebih bergantung pada peran karbon aktif dalam komposit ZnO-karbon aktif. Karbon aktif memiliki daya adsorpsi sehingga sebagian Cr(VI) dapat ditransfer ke permukaan ZnO untuk memicu reaksi fotokatalitik. Namun mekanisme ini tidak sekuat proses eksitasi langsung oleh sinar UV, sehingga kinerja pada sinar tampak tetap lebih rendah [9].

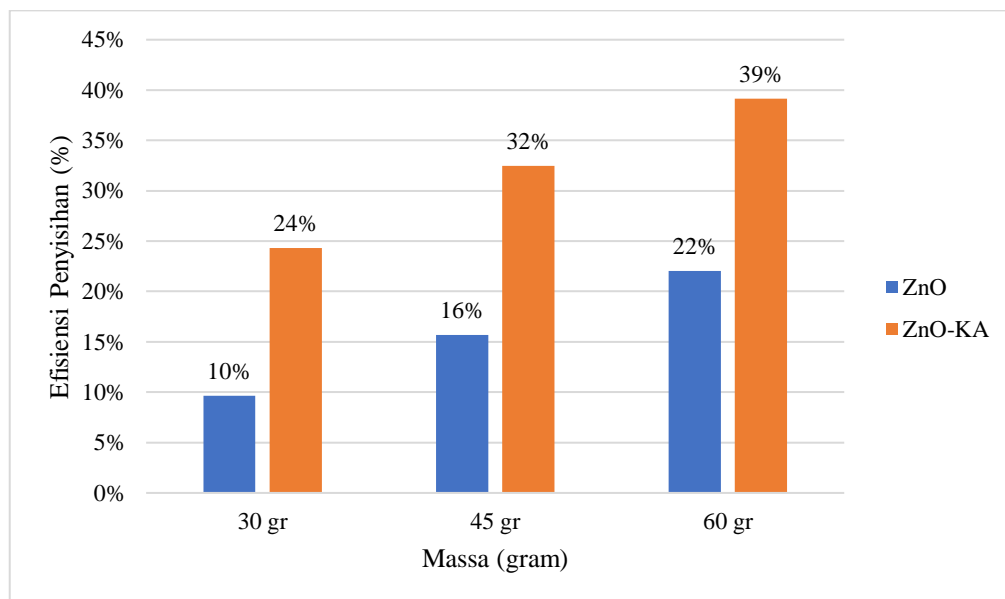
Secara keseluruhan, peningkatan kinerja di bawah sinar tampak pada penelitian ini dipengaruhi oleh adanya modifikasi ZnO dengan karbon aktif dan peningkatan massa katalis. Sesuai dengan [6], modifikasi ZnO dengan karbon aktif terbukti memberikan dampak positif yang paling signifikan melalui penurunan celah pita, sehingga dapat meningkatkan transfer elektron. Dengan demikian, penggunaan ZnO-karbon aktif menjadi strategi yang efektif untuk mengatasi keterbatasan energi sinar tampak dalam proses

fotoreduksi Cr(VI), dan menunjukkan potensi yang kuat dalam aplikasi pengolahan air limbah pada kondisi pencahayaan yang tidak menggunakan sinar UV.

Selain itu, waktu sampling juga mempengaruhi efisiensi penyisihan Cr(VI). Waktu optimal pada penelitian ini adalah di menit ke 100. Hal ini dapat dijelaskan sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh [14]. Proses sintesis katalis akan menimbulkan produk reaksi atau residu yang dapat menyebabkan penghambatan karena tertutupnya situs aktif katalis. Residu yang terikat dapat menutupi situs aktif pada permukaan ZnO selama reaksi fotokatalisis. Selain itu, residu-residu ini juga dapat menjebak pasangan elektron-hole pada reaksi fotokatalisis. Kandungan residu ini perlahan akan berkurang saat terkena oleh air walaupun tidak hilang sempurna. Energi foton semakin lama akan semakin efektif untuk dapat berinteraksi dengan katalis yang memproduksi *electron-hole* semakin banyak. Peningkatan efisiensi penyisihan hingga menit ke-100 juga menunjukkan bahwa fotokatalisis belum mencapai kondisi tunak.

Pengaruh Massa Katalis Terhadap Efisiensi Penyisihan Cr(VI)

Pada penelitian ini, digunakan beberapa variasi massa untuk membandingkan efektivitasnya terhadap kinerja fotokatalis. Massa katalis menentukan banyaknya situs aktif yang tersedia pada permukaan fotokatalis untuk menyerap foton dan berinteraksi dengan molekul polutan. Semakin besar massa katalis yang digunakan, umumnya semakin banyak pula elektron dan hole yang dapat terbentuk selama proses iradiasi cahaya, sehingga reaksi fotokatalitik berlangsung lebih intensif. Hasil penelitian dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Massa ZnO-Karbon Aktif Terhadap Efisiensi Penyisihan Cr(VI)

Berdasarkan hasil pengujian kadar Cr(VI) pada waktu sampling 100 menit, dapat diketahui bahwa massa memengaruhi penurunan kadar Cr(VI) dalam air limbah batik. Massa katalis 60 gram memiliki kemampuan paling optimal dalam proses fotokatalisis untuk mereduksi kadar Cr(VI), ZnO-karbon aktif memiliki persen removal tertinggi sebesar 39% dibandingkan ZnO murni yang hanya 22%. Massa katalis mempengaruhi luas permukaan aktif yang akan menjadi tempat tereduksinya ion Cr(VI). Secara umum, massa katalis yang semakin besar akan membuat luas permukaan yang berinteraksi semakin banyak. Penggunaan massa katalis 30 gram, 45 gram, dan 60 gram menunjukkan bahwa peningkatan massa katalis berpengaruh signifikan terhadap kinerja fotokatalisis dalam menyisihkan Cr(VI). Pada massa katalis 30 gram, kinerja fotokatalitik masih berada pada tingkat yang relatif rendah. Pada penggunaan ZnO saja, memiliki persentase removal sebesar 10%. Sementara itu, pada ZnO-karbon aktif terjadi peningkatan 24% pada waktu yang sama. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan massa katalis memperbesar luas permukaan reaktif dan jumlah situs aktif ZnO-karbon aktif, sehingga lebih banyak elektron dan hole yang dapat berpartisipasi dalam reaksi fotoreduksi Cr(VI) [15].

Peningkatan massa katalis memberikan dampak langsung terhadap peningkatan efisiensi penyisihan Cr(VI). Hal ini sesuai dengan penelitian oleh [16], bahwa semakin besar jumlah katalis maka semakin besar pula situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi dan pertukaran ion. Pada variasi massa katalis yang digunakan, massa 60 gram menunjukkan kinerja paling optimal, sehingga kondisi tersebut dapat dianggap sebagai massa optimum pada kisaran penelitian ini.

4. Kesimpulan

Komposit ZnO-karbon aktif terbukti meningkatkan kinerja fotokatalisis dalam menurunkan Cr(VI) secara signifikan dibandingkan ZnO tanpa modifikasi di bawah iradiasi sinar tampak. ZnO-karbon aktif menunjukkan persentase penurunan Cr(VI) hingga 5,36 mg/l yang lebih tinggi dibandingkan ZnO murni, yaitu 6,87 mg/l. Selain itu, massa katalis ZnO-karbon aktif dari 30 gram, 45 gram, dan 60 gram menghasilkan peningkatan efisiensi penyisihan Cr(VI). Massa katalis yang lebih besar menyebabkan produksi *electron-hole* yang lebih banyak, sehingga proses fotokatalisis Cr(VI) menjadi lebih efisien.

5. Daftar Pustaka

- [1] 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.
- [2] M. Zammi, A. Rahmawati, and R. R. Nirwana, "Analisis Dampak Limbah Buangan Limbah Pabrik Batik di Sungai Simbangkulon Kab. Pekalongan," *Walisono J. Chem.*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2018, doi: 10.21580/wjc.v2i1.2667.
- [3] L. R. I. D. Putri, A. D. Moelyaningrum, and P. T. R. Ningrum, "Kondisi Fisik Air Sungai Dan Kandungan Logam Kromium Pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) (Studi Di Sungai Kreongan Sekitar Industri Batik X, Kecamatan Patrang, Kabupaten Jember)," *J. Kesehat. Lingkung. Indones.*, vol. 21, no. 3, pp. 293–300, 2022, doi: 10.14710/jkli.21.3.293-300.
- [4] L. Nainggolan, I. W. Sudiarta, and I. W. Suarsa, "Sintesis Fotokatalis ZnO-SiO₂ Dengan Metode Sol Gel Untuk Fotodegradasi Zat Warna Rhodamin B," *J. Kim.*, vol. 17, p. 143, 2023, doi: 10.24843/jchem.2023.v17.i02.p05.
- [5] R. Bemis, Nelson, Ngatijo, S. Nurjanah, and N. Maghviroh, "Sintesis dan karakterisasi fotokatalis ZnO/karbon aktif dan aplikasinya pada degradasi rhodamin B," *Chempublish J.*, vol. 4, no. 2, pp. 101–113, 2019, doi: 10.22437/chp.v4i2.7936.
- [6] M. Syabila and K. Miftahul, "Penurunan Celah Pita ZnO Dengan Impregnasinya Pada Karbon Aktif," *EKASAKTI J. Penelit. Pengabdian.*, vol. 3, 2022, doi: <https://doi.org/10.31933/ejpp.v3i1>.
- [7] Kazal, Nuriadin. *Kapasitas Resin Immobilized Photocatalyst-ZnO untuk Menyisihkan Parameter Total Nitrogen dan Fosfat pada Limbah Tahu dalam Reaktor Fotokatalis secara Continue*. Diss. UPN Veteran Jawa Timur, 2024.
- [8] A. Baig and M. Siddique, "A Review of Visible-Light-Active Zinc Oxide Photocatalysts for Environmental Application," pp. 1–26, 2025.
- [9] X. Chen and Z. Wu, "Effect of Different Activated Carbon as Carrier on the Photocatalytic Activity of Ag-N-ZnO Photocatalyst for Methyl Orange Degradation under Visible Light Irradiation," 2017, doi: 10.3390/nano7090258.
- [10] V. Ramya, D. Murugan, C. Lajapathirai, and A. Sivasamy, "Activated carbon (prepared from secondary sludge biomass) supported semiconductor zinc oxide nanocomposite photocatalyst for reduction of Cr(VI) under visible light irradiation," *Biochem. Pharmacol.*, no. Vi, 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.08.055.
- [11] A. B. Lavand and Y. S. Malghe, "Synthesis, characterization and visible light photocatalytic activity of carbon and iron modified ZnO," *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 65–74, 2018, doi: 10.1016/j.jksus.2016.08.009.
- [12] Z. Chen, Y. Luo, C. Huang, and X. Shen, "In situ assembly of ZnO / graphene oxide on synthetic molecular receptors: Towards selective photoreduction of Cr (VI) via interfacial synergistic catalysis," *Chem. Eng. J.*, vol. 414, no. December 2020, p. 128914, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.128914.
- [13] Listiorini, Listiorini, Helga Dwi Fahyuan, and Ngatijo Ngatijo. "Pengaruh Doping Al Terhadap Band Gap Energy Lapisan Tipis ZnO." *Journal Online of Physics* 4.1 (2018): 24-29.
- [14] F. G. Svensson, E. Djurberg, S. Kim, G. Westin, and O. Lars, "Effect of Surface Impurities and Lattice Defects on the Photocatalytic Activity of ZnO Nanoparticles," 2025, doi: 10.1021/acs.langmuir.5c03385.
- [15] N. W. A. Widiartari, N. P. Diantariani, and I. W. B. Suyasa, "Fotoreduksi Ion Logam Cr(Vi) Menjadi Cr(III) Menggunakan Katalis ZnO/Kitosan," *J. Chem.*, vol. 18, no. 2, p. p-ISSN, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.24843/JCHEM.2024.v18.i02.p08>
- [16] Zilfa, R. Zein, and T. Nurhayatul Rahmi, "Pemanfaatan Zeolit Alam Clinoptilolite-Ca Sebagai Pendukung Katalis ZnO Untuk Mendegradasi Zat Warna Methyl Orange Dengan Metoda Fotolisis," *J. Res. Educ. Chem.*, vol. 5, no. 1, p. 24, 2023, doi: 10.25299/jrec.2023.vol5(1).12505.