



Review: Pemanfaatan TiO_2 sebagai Fotokatalis dan Adsorben dalam Pengolahan Limbah Cair

Isna Auliya Sari, Rossi Ayuningsyas, Trias Nurul Jati

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta, 55281
Email: triasnuruljati@gmail.com

Abstrak. Semikonduktor titanium dioksida (TiO_2) telah banyak diteliti sebagai material utama dalam pengolahan limbah cair karena sifat fisik dan kimianya yang stabil serta aktivitas fotokatalis yang tinggi. TiO_2 dapat berperan ganda sebagai fotokatalis dan adsorben dalam proses degradasi polutan organik maupun anorganik pada limbah cair. Berbagai metode sintesis nanopartikel TiO_2 telah dikembangkan untuk meningkatkan performa fotokatalis dan kapasitas adsorpsinya, diantaranya adalah metode sol-gel dan hidrotermal. Metode-metode tersebut memengaruhi karakteristik fisik seperti ukuran partikel, luas permukaan, kristalinitas, dan komposisi fasa, yang berkontribusi pada efektivitas TiO_2 dalam aplikasi pengolahan limbah. Selain itu, kombinasi TiO_2 dengan bahan adsorben seperti zeolit, karbon aktif, dan abu vulkanik juga menunjukkan peningkatan efisiensi penghilangan kontaminan. Tinjauan ini mengkaji berbagai pendekatan sintesis dan aplikasi TiO_2 sebagai fotokatalis dan adsorben, serta membandingkan efektivitasnya dalam mengatasi berbagai jenis limbah cair industri. Dengan pemahaman mendalam mengenai metode dan performa TiO_2 , diharapkan pengembangan teknologi pengolahan limbah cair berbasis fotokatalis dapat lebih optimal dan berkelanjutan.

Kata kunci: TiO_2 , fotokatalis, adsorben, pengolahan limbah cair

Abstract. Titanium dioxide (TiO_2) semiconductors have been extensively studied as a key material in wastewater treatment due to their stable physical and chemical properties as well as their high photocatalytic activity. TiO_2 can serve a dual role as both a photocatalyst and an adsorbent in the degradation of organic and inorganic pollutants in wastewater. Various synthesis methods for TiO_2 nanoparticles have been developed to enhance their photocatalytic performance and adsorption capacity, including sol-gel and hydrothermal methods. These methods influence physical characteristics such as particle size, surface area, crystallinity, and phase composition, all of which contribute to the effectiveness of TiO_2 in wastewater treatment applications. Additionally, the combination of TiO_2 with adsorbent materials such as zeolite, activated carbon, and volcanic ash has shown improved contaminant removal efficiency. This review explores various synthesis approaches and the application of TiO_2 as a photocatalyst and adsorbent, as well as compares its effectiveness in addressing different types of industrial wastewater. With a deeper understanding of TiO_2 synthesis methods and performance, the development of photocatalyst-based wastewater treatment technologies is expected to become more efficient and sustainable.

Keywords: TiO_2 , photocatalyst, adsorbent, wastewater treatment

This publication is licensed under a



Pendahuluan

Limbah cair merupakan sisa hasil kegiatan yang berwujud cair. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 Tahun 2001, air limbah didefinisikan sebagai sisa hasil suatu kegiatan atau usaha yang berwujud cair. Sumber limbah cair dapat berasal dari kegiatan rumah tangga maupun kegiatan industri (Swandayani & Sulastris, 2020). Limbah cair apabila tidak ditangani dengan baik dapat memberikan dampak yang merugikan bagi lingkungan dan ekosistem perairan, karena dapat mengganggu keseimbangan alam dan mempengaruhi kelangsungan hidup makhluk hidup. Oleh karena itu, pembuangan limbah harus memenuhi baku mutu yang ditetapkan atau mencapai mutu tertentu sebelum dibuang, agar tidak menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan (Novitasari *et al.*, 2018).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah cair, seperti biodegradasi, penggunaan klorin, karbon aktif, filtrasi, dan metode lainnya (Kumari *et al.*, 2023). Namun, pendekatan-pendekatan tersebut masih memiliki sejumlah kelemahan, seperti menghasilkan residu yang berbahaya, memerlukan penanganan lanjutan yang rumit, serta memerlukan biaya dan konsumsi energi yang tinggi (Kumari *et al.*, 2023). Air

yang tercemar umumnya menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan air bersih, baik secara fisik, kimia, maupun biologis, dan kondisi pencemaran ini dapat dikenali melalui sejumlah indikator spesifik (Purnamawati *et al.*, 2015). Untuk mengatasi masalah tersebut, telah diterapkan berbagai teknik penjernihan air (Kencanawati, 2016), salah satunya dengan memanfaatkan bahan fotokatalis yang diaktivasi oleh sinar matahari.

Pengolahan limbah cair industri selama ini telah dilakukan dengan proses adsorpsi dan fotodegradasi. Kedua metode tersebut memiliki karakteristik masing-masing dalam mendegradasi polutan dalam limbah cair. Pada metode adsorpsi, terdapat beberapa kelemahan, yaitu selektivitas yang rendah terutama untuk limbah yang kompleks dan proses regenerasi adsorben yang sulit (Fatimah & Setiaji, 2001). Selain itu, polutan yang telah teradsorpsi tetap terakumulasi dalam media adsorben sehingga berpotensi menimbulkan masalah baru di kemudian hari. Metode adsorpsi juga hanya efektif untuk beberapa jenis senyawa polutan dan cenderung membutuhkan biaya yang cukup tinggi dalam proses pengelolannya (Nurillahi *et al.*, 2018).

Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih efisien dan optimal dalam mengolah limbah cair industri. Salah

satu metode yang dikembangkan adalah fotodegradasi dengan bantuan bahan fotokatalis. Proses fotokatalisis terjadi melalui mekanisme dasar berupa terbentuknya pasangan elektron dan *hole* pada permukaan katalis semikonduktor yang dipicu oleh paparan energi foton dengan intensitas yang sesuai (Gunlazuardi, 2001). Melalui proses ini, zat warna dan polutan dapat diurai menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti CO₂ dan H₂O yang ramah lingkungan. Dengan demikian, metode ini juga dapat mengurangi kebutuhan regenerasi adsorben (Purnawan *et al.*, 2011).

Metode fotodegradasi dapat dilakukan dengan menggunakan katalis semikonduktor. Katalis semikonduktor yang sering digunakan adalah TiO₂, ZnO, CdS dan Fe₂O₃. TiO₂ merupakan katalis semikonduktor yang paling efektif karena memiliki energi gap yang relatif besar (3,2 eV) sehingga cocok digunakan sebagai fotokatalis, tidak beracun, terjangkau dan melimpah di alam (Joshi & Shirivastva, 2010). Selain itu, TiO₂ bersifat inert secara kimia dan biologi, biaya relatif murah, dan tidak toksik, menjadikannya pilihan utama dalam pengolahan limbah cair melalui fotokatalisis (Behpour *et al.*, 2010; Miyake *et al.*, 2015).

Fotokatalisis dengan TiO₂ bekerja dengan cara mengubah energi cahaya menjadi energi kimia yang menghasilkan radikal hidroksil (-OH) yang sangat reaktif yang mampu menguraikan senyawa pencemar organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang berbahaya seperti CO₂ dan H₂O (Miyake *et al.*, 2015). Bentuk kristal anatase dari TiO₂ diketahui memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi dibandingkan bentuk rutil, sehingga lebih efektif dalam proses degradasi pencemar (Fatimah & Wijaya, 2005). Penggunaan TiO₂ juga dapat dikombinasikan dengan media adsorben seperti zeolit untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair melalui mekanisme adsorpsi dan fotodegradasi secara simultan (Fatimah & Wijaya, 2005). Namun, penggunaan TiO₂ sebagai fotokatalis juga memiliki keterbatasan, seperti laju rekombinasi pasangan *elektron-hole* yang cepat, sehingga dapat menurunkan efisiensi fotodegradasi. Oleh karena itu, berbagai modifikasi dan kombinasi metode terus dikembangkan untuk mengatasi masalah ini dan meningkatkan kinerja TiO₂ dalam pengolahan air limbah (Andari *et al.*, 2014; Lei *et al.*, 2007). Dengan demikian, penggunaan TiO₂ sebagai fotokatalis dan adsorben dalam pengolahan air limbah menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengatasi pencemaran air secara efisien dan ramah lingkungan, sekaligus mengurangi dampak negatif dari metode pengolahan konvensional. Penelitian dan pengembangan lebih lanjut di bidang ini sangat penting untuk mengoptimalkan penerapan TiO₂ dalam skala industri dan memperluas penggunaannya dalam berbagai jenis air limbah.

Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ini adalah tinjauan pustaka (*literature review*) dengan menelusuri dan menganalisis penelitian-penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya. Penelusuran pustaka dilakukan melalui basis data akademik dan jurnal ilmiah untuk mengidentifikasi penelitian-penelitian mengenai pemanfaatan fotokatalis dan adsorben TiO₂

pada limbah cair. Artikel-artikel terpilih kemudian dianalisis secara mendalam untuk mendapatkan informasi tentang metode sintesis, karakterisasi, dan aplikasi TiO₂ dalam pengolahan limbah cair. Informasi yang diperoleh dari artikel-artikel tersebut disusun dan disintesis menjadi beberapa bagian yang relevan dengan pemanfaatan fotokatalis dan adsorben TiO₂ pada limbah cair. Hal ini dilakukan agar terbentuk suatu struktur artikel yang runtut dan terorganisir. Informasi yang telah disintesis kemudian dijadikan dasar penulisan artikel tinjauan ini.

Hasil dan Pembahasan

Sintesis Fotokatalis TiO₂

Secara umum, pembuatan fotokatalis TiO₂ dilakukan melalui metode sol-gel, yaitu dengan menambahkan asam dan memanaskannya pada suhu tertentu. Metode ini memungkinkan terbentuknya partikel dengan ukuran nanometer yang seragam, tidak mengalami penggumpalan, memiliki kemurnian tinggi, bersifat homogen, dan memungkinkan pengendalian distribusi massa (Suchaya *et al.*, 2016). Berbagai penelitian telah dilakukan terhadap sintesis nanopartikel dari semikonduktor oksida dengan menggunakan pendekatan ini. Pada penelitian Nurillahi *et al.*, (2018) material fotokatalis dibuat dengan mendispersikan prekursor titanium (Ti) ke dalam suspensi abu vulkanik, kemudian dilakukan proses pengeringan dan kalsinasi pada suhu 500°C selama 2 jam. Karakterisasi material dilakukan dengan menggunakan teknik *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FT-IR), dan Spektrofotometer *UV-Visible*. Karakterisasi menggunakan XRF bertujuan mengidentifikasi komposisi kimia unsur pada abu vulkanik murni dan material komposit Ti-Abu vulkanik hasil sintesis. XRF menghasilkan difraktogram yang menunjukkan bahwa terjadinya peningkatan persentase kandungan unsur Ti dari 2,21% menjadi 10,7%. Komposit Ti-Abu vulkanik digunakan untuk fotodegradasi limbah cair di bawah sinar UV di ruang gelap, dengan variasi waktu penyinaran dan analisis menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. Pengujian dilakukan dengan dan tanpa penambahan H₂O₂ sebagai oksidator. Hasilnya menunjukkan bahwa katalis Ti-Abu vulkanik dengan oksidator H₂O₂ menghasilkan efisiensi degradasi lebih tinggi (97,43%) dibandingkan tanpa H₂O₂ (86%).

Selain itu, penelitian Hikmah *et al.*, (2023) juga sintesis fotokatalis TiO₂ menggunakan metode yang sama, yaitu sol-gel untuk degradasi metilen biru. Material fotokatalis dibuat dengan pencampuran larutan A yang mengandung TTiP, etanol, dan asam asetat, dengan larutan B yang terdiri dari air, etanol, dan *sodium dodecyl sulfate*. Campuran kemudian dibiarkan selama 24 jam untuk membentuk gel dan dipisahkan untuk kemudian digiling serta dikalsinasi pada suhu 350 °C selama 6 jam. Karakterisasi fotokatalis TiO₂ dilakukan dengan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform InfraRed Spectroscopy* (FTIR), dan *Diffuse Reflectance Spectroscopy UV-Vis* (DRS UV-Vis). Karakterisasi XRD menghasilkan difraktogram sehingga dapat diketahui ukuran kristal, yaitu sebesar 18,25 nm. Karakterisasi TiO₂ sintetik menggunakan FTIR berhasil mengidentifikasi gugus fungsi utama yaitu OH (3417,86 dan 1627,92 cm⁻¹) yang

mengindikasikan adanya air yang teradsorpsi dan OH yang terikat pada Ti, serta vibrasi Ti–O (813,96 cm⁻¹) dan Ti–O–Ti (451,34 cm⁻¹) pada fase anatase. Hasil karakterisasi DRS UV-Vis menunjukkan bahwa energi celah pita TiO₂ adalah 3,08 eV. Oleh karena itu, fotokatalis TiO₂ dalam penelitian ini bekerja lebih efektif di bawah paparan cahaya tampak, sehingga cahaya LED dipilih sebagai sumber foton dalam uji aktivitas fotokatalitik. Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan konsentrasi metilen biru, dimana efisiensi degradasinya mencapai 24,5%. Hal ini dipengaruhi oleh lama waktu penyinaran selama 4 jam. Dengan demikian, semakin lama waktu penyinaran, maka waktu kontak antara fotokatalis TiO₂ dengan metilen biru semakin lama, sehingga efisiensi degradasinya pun semakin meningkat.

Penelitian Tussa'adah (2015) mengembangkan fotokatalis titanium dioksida (TiO₂) melalui sintesis sederhana dengan pemanasan larutan TiO₂ dan polietilen glikol (PEG 6000) dalam air. Campuran ini diaduk selama satu jam, lalu dipanaskan pada suhu 400°C dengan variasi waktu tahan 0–3 jam. Analisis XRD menunjukkan ukuran kristal TiO₂ sebesar 59,09 nm dan struktur anatase, tanpa pengaruh signifikan dari waktu tahan terhadap ukuran kristal. Namun, waktu tahan yang lebih lama meningkatkan intensitas difraksi. Hasil SEM menunjukkan partikel TiO₂ berbentuk bulat dan seragam, dengan ukuran dominan 119 nm pada sampel tanpa penahanan waktu. Semakin lama waktu tahan, partikel semakin besar dan terjadi aglomerasi. Pengujian aktivitas fotokatalis dilakukan pada limbah tekstil industri, dengan hasil menunjukkan penurunan pH dari 10,09 menjadi 9,06 dan penurunan TDS dari 1191 mg/L menjadi 409 mg/L pada sampel tanpa penahanan waktu. Penurunan TDS terbesar terjadi pada partikel TiO₂ berukuran lebih kecil, yang diduga meningkatkan efektivitas fotokatalis. Proses fotodegradasi melibatkan pembentukan radikal hidroksil melalui mekanisme fotooksidasi dan fotoreduksi, sehingga limbah menjadi jernih, tidak berwarna, dan tidak berbau.

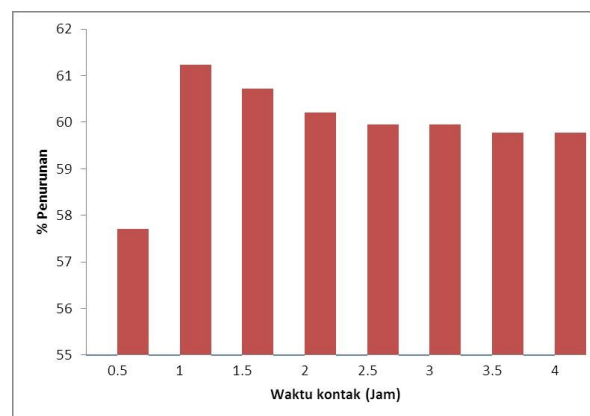
Aplikasi TiO₂ dalam Fotodegradasi Pengolahan Limbah Cair

Aplikasi TiO₂ dalam fotodegradasi pengolahan air limbah didasarkan pada mekanisme utama proses fotokatalisis, yaitu terbentuknya pasangan *elektron-hole* (*charge hole*) pada permukaan katalis semikonduktor akibat paparan energi foton yang sesuai (Gunlazuardi, 2001). Teknologi fotokatalisis berbasis semikonduktor ini terbukti efektif dalam menguraikan berbagai polutan organik, baik dalam fasa gas maupun cair, dengan cara mengoksidasi senyawa organik menjadi produk akhir yang ramah lingkungan seperti karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O). Pada penelitian yang dilakukan oleh (Slamet, 2008) dipilih TiO₂ sebagai fotokatalis karena memiliki aktivitas fotokatalitik yang tinggi, mudah diperoleh, serta memiliki kestabilan kimia dan ketahanan terhadap fotokorosi yang sangat baik (Slamet, 2008).

Teknologi pengolahan air limbah dengan proses fotokatalisis memanfaatkan energi sinar matahari untuk mengaktifkan katalis seperti TiO₂ yang memerlukan energi foton dengan panjang gelombang kecil. TiO₂ sendiri merupakan senyawa berwarna putih yang tahan karat, tidak beracun, dan dikenal sebagai salah satu katalis yang paling stabil dan banyak digunakan (Abdullah,

2011). Aplikasi semikonduktor fotokatalitik berbasis TiO₂ telah diterapkan dalam berbagai bidang, seperti pemurnian air dan udara, penghancuran mikroorganisme, aktivasi sel kanker, degradasi zat warna dan senyawa toksik, serta produksi gas hidrogen dari air (Rahmawati *et al.*, 2020). Penelitian terdahulu oleh Nugroho (2011) menunjukkan bahwa penggunaan sistem pengolahan air limbah berbasis TiO₂ mampu menjernihkan air, menghilangkan bau, serta menurunkan nilai TDS sebesar 44,08%, BOD sebesar 73,44%, dan COD sebesar 71,21%. Sementara itu, penelitian Fajar (2010) berhasil melapisi struktur kristal anatase TiO₂ pada karbon aktif yang menunjukkan efektivitas tinggi dalam mereduksi bakteri *E. coli* hingga 100% setelah proses pemurnian selama 3 jam, sehingga memperkuat potensi TiO₂ sebagai fotokatalis dalam sistem pengolahan limbah cair.

Proses fotodegradasi suatu senyawa, seperti tartrazina, sangat dipengaruhi oleh waktu kontak antara fotokatalis dengan zat yang didegradasi. Pengaruh waktu kontak TiO₂ terhadap aktivitas fotokatalitiknya dalam menurunkan kadar tartrazina pada limbah cair industri mi dapat diamati melalui persentase penurunan kadar tartrazina setelah pengolahan. Semakin lama fotokatalis TiO₂ berkontak dengan limbah yang mengandung tartrazina, maka semakin besar peluang terjadinya reaksi fotokatalitik yang efektif. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya interaksi antara TiO₂ dan tartrazina merupakan faktor penting dalam menentukan efisiensi proses degradasi zat warna (Dwiarsi & Setyaningtyas, 2014).



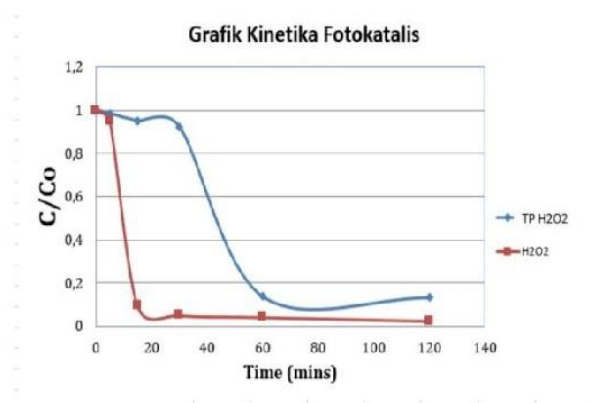
Gambar 1. Pengaruh waktu kontak terhadap aktivitas fotokatalis TiO₂ (Dwiarsi & Setyaningtyas, 2014)

Berdasarkan gambar 1 diatas, diketahui bahwa waktu 1 jam merupakan kondisi paling optimal bagi aktivitas fotokatalis TiO₂ dalam menurunkan konsentrasi zat warna tartrazina pada limbah cair industri mi. Pada durasi tersebut, fotokatalis TiO₂ mampu menurunkan kadar tartrazina sebanyak 10,972 ppm atau sekitar 61,24%. Efisiensi tertinggi ini menunjukkan bahwa pada waktu 1 jam terjadi penyerapan energi foton (hv) paling efektif, sehingga sejumlah besar elektron dari pita valensi tereksitasi ke pita konduksi. Eksitasi ini menghasilkan sejumlah besar hole positif (hole⁺) yang kemudian bereaksi dengan molekul udara atau ion hidroksil (OH⁻) membentuk radikal hidroksil (•OH). Radikal •OH berperan penting dalam proses degradasi senyawa organik,

termasuk tartrazina, melalui mekanisme oksidasi tingkat lanjut (Hoffman, 1995).

Hasil yang diperoleh pada penelitian tersebut menunjukkan perbedaan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Azuan (2001) yang menyatakan bahwa TiO_2 murni mampu mendegradasi tartrazina hingga 80% dalam waktu kontak 2 jam dengan konsentrasi TiO_2 sebesar 1,0 g/L. Sedangkan pada penelitian ini konsentrasi TiO_2 yang digunakan sebesar 2,0 g/L. Perbedaan efisiensi degradasi tersebut kemungkinan disebabkan oleh perbedaan konsentrasi fotokatalis yang digunakan. Peningkatan jumlah TiO_2 dapat menyebabkan terjadinya penggumpalan partikel sehingga mengurangi luas permukaan aktif yang tersedia dan mengurangi efektivitas penyerapan cahaya serta pembentukan radikal bebas yang berperan dalam proses degradasi.

Nurillahi et al. (2018) dalam penelitiannya menggunakan komposit fotokatalis Ti-Abu vulkanik untuk fotodegradasi menunjukkan bahwa degradasi fotokatalitik limbah cair batik menggunakan katalis Ti-Abu vulkanik menunjukkan hubungan yang jelas antara durasi pengolahan dan efektivitas.



Gambar 2. Grafik Kinetika Fotokatalis Ti-Abu Vulkanik (Nurillahi *et al.*, 2018)

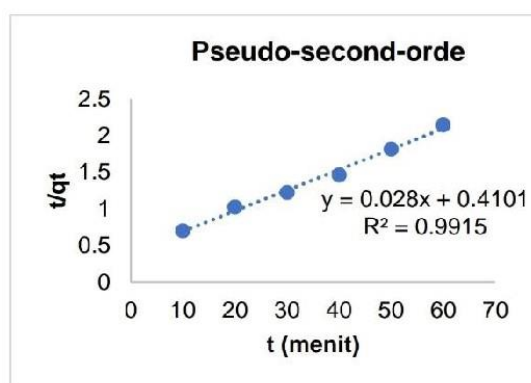
Seiring bertambahnya waktu penyinaran UV, konsentrasi polutan limbah cair batik menurun. Analisis komparatif menunjukkan bahwa penambahan H_2O_2 sebagai oksidan secara signifikan meningkatkan efisiensi degradasi. Proses ini mencapai efisiensi degradasi sebesar 97,43% dengan H_2O_2 , dibandingkan dengan hanya 86% tanpa oksidan. Hal ini menunjukkan peran penting suplementasi oksidan dalam mengoptimalkan kinerja fotokatalis untuk pengolahan limbah cair batik. Selain itu, pengamatan visual mengkonfirmasi keberhasilan degradasi, karena air limbah berubah dari berwarna menjadi bening setelah pengolahan fotokatalis. Perubahan tersebut disebabkan oleh adanya penyinaran sinar UV yang berperan dalam pembentukan radikal hidroksil (OH), dimana semakin lama waktu penyinaran maka radikal OH yang terbentuk akan semakin banyak. Radikal OH ini berperan penting dalam mengoksidasi zat warna yang terkandung dalam limbah batik. Selain itu hasil analisis menunjukkan bahwa proses fotokatalisis juga berhasil menurunkan kadar Chemical Oxygen Demand (COD) secara signifikan yaitu dari 4270 ppm menjadi 115,7 ppm. Penurunan

nilai COD ini menunjukkan bahwa limbah hasil pengolahan tersebut aman untuk dibuang ke lingkungan, karena telah memenuhi baku mutu limbah cair menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51/MENLH/10/1995 yang menetapkan nilai COD maksimal 300 ppm. Dengan demikian metode fotokatalisis selain efektif dalam menghilangkan warna limbah, juga mampu mengurangi beban pencemaran sehingga limbah yang dihasilkan aman dan tidak membahayakan lingkungan.

Aplikasi TiO_2 sebagai Adsorben

Fotokatalisis merupakan suatu proses reaksi kimia yang melibatkan cahaya dan katalis, biasanya berupa material semikonduktor. Beberapa contoh semikonduktor yang umum digunakan dalam proses ini antara lain zinc oxide (ZnO), zinc sulfide (ZnS), titanium oxide (TiO_2), tungsten oxide (WO_3), hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), dan strontium titanate (SrTiO_3). Pada mekanisme fotokatalisis, permukaan semikonduktor berperan penting dalam mengadsorpsi molekul-molekul polutan dari lingkungan. Proses adsorpsi ini merupakan tahap awal yang sangat krusial, karena menentukan keberhasilan langkah-langkah selanjutnya. Setelah molekul-molekul polutan diadsorpsi pada permukaan semikonduktor, paparan cahaya akan memicu terbentuknya radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang merupakan oksidan yang sangat kuat dengan potensial oksidasi sekitar 2,8 V. Radikal-radikal ini mampu menguraikan dan memineralisasi senyawa-senyawa berbahaya menjadi senyawa-senyawa yang tidak beracun seperti CO_2 dan H_2O (Prastika & Alamsyah, 2022).

Hasil analisis penelitian Prastika dan Alamsyah (2022) menunjukkan bahwa jumlah zat yang teradsorpsi pada waktu t mencapai titik kesetimbangan tertinggi setelah 60 menit, yaitu sebesar 28,042 mg/g. Pada uji kinetika adsorpsi, model pseudo-second-order merupakan model yang paling mendekati (tepat digunakan) dalam percobaan proses adsorpsi asam tanat menggunakan fotokatalis $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$. Hal ini diperkuat dengan nilai R^2 yang menampilkan grafik dengan garis lurus.



Gambar 3. Grafik Kinetika Adsorpsi Model Pseudo-second-order (Prastika & Alamsyah, 2022)

Kondisi ini menunjukkan adanya peningkatan keacakan pada batas antara padatan dan larutan saat adsorbat terikat pada bagian aktif adsorben, dan menunjukkan bahwa kondisi kinetika proses adsorpsi berada pada keadaan optimal.

Adsorpsi memegang peranan penting dalam proses fotokatalisis, karena merupakan salah satu komponen penting dalam mekanisme yang berkaitan erat dengan peningkatan efisiensi penghilangan kandungan asam tanat dari lingkungan perairan, sehingga mendukung proses mineralisasi polutan organik dan menciptakan lingkungan yang lebih bersih (Zhang et al., 2017). Dalam sistem adsorpsi, aspek utama yang dianalisis adalah kinetika adsorpsi, yang menggambarkan laju adsorpsi antara adsorben dan adsorbat, dan digunakan untuk menentukan konstanta laju proses adsorpsi (Banerjee et al., 2019; Edet & Ifelebuegu, 2020).

Aplikasi TiO₂ dalam Kombinasi Fotodegradasi-Adsorpsi Pengolahan Limbah Cair

Aplikasi TiO₂ dalam kombinasi fotodegradasi-adsorpsi untuk pengolahan limbah cair didasarkan pada mekanisme fotokatalisis, yaitu terbentuknya pasangan elektron-hole pada permukaan semikonduktor TiO₂ saat terkena energi foton dari sinar ultraviolet atau cahaya matahari (Gunlazuardi, 2001). Pasangan elektron-hole ini menghasilkan radikal hidroksil (-OH) yang sangat reaktif dan mampu mengoksidasi polutan organik kompleks menjadi senyawa sederhana seperti karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) yang ramah lingkungan (Hoffmann, 1995; Riyani et al., 2010). TiO₂ dipilih sebagai fotokatalis karena memiliki energi gap yang sesuai (~3,2 eV), stabil secara kimia, tidak beracun, tahan terhadap fotokorosi, serta melimpah dan terjangkau (Slamet, 2008; Abdullah, 2011). Dalam aplikasi pengolahan limbah cair industri, TiO₂ sering dikombinasikan dengan bahan adsorben seperti zeolit atau karbon aktif untuk meningkatkan efisiensi pengolahan melalui mekanisme ganda adsorpsi dan fotodegradasi (Fatimah & Wijaya, 2005). Zeolit berfungsi mengadsorpsi polutan dari limbah cair dan mengkonsentrasikannya di sekitar permukaan katalis TiO₂, sehingga memudahkan proses degradasi fotokatalitik. Proses adsorpsi ini penting untuk mengatasi keterbatasan fotodegradasi yang biasanya terhambat oleh rendahnya konsentrasi polutan di permukaan katalis (Fatimah & Wijaya, 2005).

Penelitian oleh Fatimah & Wijaya (2005) menunjukkan bahwa material TiO₂/zeolit mampu menurunkan kadar Chemical Oxygen Demand (COD) dan sianida dalam limbah cair industri tapioka secara signifikan, dengan efisiensi fotodegradasi mencapai lebih dari 90% pada kondisi optimal. Hasil ini didukung oleh karakterisasi material yang menunjukkan bahwa TiO₂ terdispersi dengan baik pada permukaan zeolit, meskipun terjadi sedikit penurunan luas permukaan spesifik akibat penutupan pori (Fatimah & Wijaya, 2005). Selain itu, penelitian lain melaporkan bahwa kombinasi TiO₂ dengan karbon aktif juga efektif dalam menurunkan parameter pencemar seperti fosfat, Optical Density (OD), dan zat warna pada limbah cair. Kombinasi ini memanfaatkan kemampuan karbon aktif dalam adsorpsi dan TiO₂ dalam fotodegradasi, sehingga proses degradasi polutan menjadi lebih cepat dan efisien.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa fotokatalisis dengan menggunakan titanium dioksida (TiO₂) terbukti efektif sebagai solusi alternatif pengolahan limbah cair karena memiliki stabilitas kimia dan fotokimia yang tinggi, tidak beracun, biaya produksi rendah, serta ketersediaan yang melimpah. TiO₂ bekerja dengan membentuk pasangan elektron-hole saat terpapar cahaya, menghasilkan radikal hidroksil yang mampu mengoksidasi polutan organik menjadi senyawa ramah lingkungan seperti CO₂ dan H₂O. Berbagai metode sintesis, seperti sol-gel, hidrotermal, serta kombinasi TiO₂ dengan zeolit, karbon aktif, atau abu vulkanik, mampu meningkatkan efisiensi proses degradasi dan adsorpsi polutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi ini tidak hanya efektif menghilangkan warna, bau, dan menurunkan kadar COD, tetapi juga aman bagi lingkungan. Pengembangan lebih lanjut diperlukan agar aplikasinya dapat dioptimalkan pada berbagai jenis limbah dan skala industri.

Daftar Pustaka

- Abdullah, M. Arutanti, O. Isnaeni, V.A. Fitria, I. Amalia. Maturi. Aliah, H. dan Khairurrijal. (2011), Pengolahan Air Limbah dengan Material Struktur Nanometer, *Jurnal Seminar Kontribusi Fisika*, INV05.
- Andari, N. D., & Wardhani, S. (2014). Fotokatalis TiO₂-Zeolit untuk Degradasi Metilen Biru. *Chem Prog.* 7(1).
- Azuan, H., R.M. Abdul, K.T. Lee, 2001, Solar Photocatalytic Degradation of Tartrazine using Titanium Dioxide, *Jurnal Teknologi*, C, 35 (F). pp. 31-40.
- Banerjee, M., Basu, R. kumar, & Das, S. K. (2019). Adsorptive removal of Cu (II) by pistachio shell: Isotherm study, kinetic modelling and scale-up designing — continuous mode. *Environmental Technology and Innovation*, 15.
- Behpour, M., Ghoreishi, S.M. and Razavi, F.S. (2010) Photocatalytic Activity of TiO₂/Ag Nanoparticle on Degradation of Water Pollutions. *Digest Journal of Nanomaterial Biostructures*, 5, 467-475.
- Dwiasi, D. W., & Setyaningtyas, T. (2014). Fotodegradasi zat warna tartrazin limbah cair industri mie menggunakan fotokatalis TiO₂-Sinar Matahari. *Molekul*, 9(1), 56-62.
- Edet, U. A. and Ifelebuegu, A. O. (2020). Kinetics, isotherms, and thermodynamic modeling of the adsorption of phosphates from model wastewater using recycled brick waste. *Processes*. MDPI AG, 8(6).
- Fajar T, M., 2010, *Sistem Penjernihan Air yang Tercemar Bakteri E.Coli Berbasis Fotokatalis TiO₂ Dikombinasikan dengan Bahan Aktif*, Skripsi Fisika, Universitas Diponegoro, Semarang
- Fatimah, I., & Setiaji, B. (2001). Zeolit Alam sebagai Adsorben Limbah Cair Industri Tapioka. *In Prosiding the 1st Indonesian Seminar on Zeolite* ISSN (pp. 1411-6723)
- Fatimah, I., & Wijaya, K. (2005). Sintesis TiO₂/zeolit sebagai fotokatalis pada pengolahan limbah cair industri tapioka secara adsorpsi-fotodegradasi. *Teknoin*, 10(4).

- Gunlazuardi, J. (2001) *Fotokatalitik pada Permukaan TiO₂*, FMIPA Universitas Indonesia, Jakarta.
- Hikmah, M., & Wahyuni, N. (2023). Sintesis Fotokatalis TiO₂ untuk Degradasi Zat Warna Sintetis Metilen Biru dengan Bantuan Sinar Tampak. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3), 878-887.
- Hoffman, R.M., 1995, Environmental Applications of Semiconductor of Photocatalysis, *Chemical Reviews*, Vol. 95, No. 1, pp. 69-96.
- Joshi, K. M., Shirivastva, V. S. (2010). Removal of Hazardious Textile dyes From Aqueous Solution by Using Commercial Activated Carbon with TiO₂ and ZnO as Photocatalyst. *International Journal of Chem Tech Researh*, (2), 427-435.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 13(April), 15–38.
- Kencanawati, C. I. P. K. (2016). Sistem Pengelolaan Air Limbah. *Universitas Udayana*.
- Kumari, H., Sonia, Suman, Ranga, R., Chahal, S., Devi, S. & Parmar, R. (2023). A Review on Photocatalysis Used For Wastewater Treatment: Dye Degradation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(6), 349.
- Lei L., Su Y., Zhou M., Zhang X., Chen X. (2007). Fabrication of Multi metal-Doped TiO₂ Nanotube by Anodization in Mixed Acid Solution. *Material Research Bulletin*. 42: 2230-2236
- Miyake S, Kim S, Suda W, Oshima K, Nakamura M, Matsuoka T, Chihara N, Tomita A, Sato W, Kim SW, Morita H, Hattori M, Yamamura T. (2015). Dysbiosis in the Gut Microbiota of Patients with Multiple Sclerosis, with a Striking Depletion of Species Belonging to Clostridia XIVa and IV Clusters. *PLoS One*, 10(9)
- Nisah, K., Aida, N., & Maufunna, Z. (2023). Uji Efektivitas Pengolahan Air Limbah Tahu Dengan Metode Fotodegradasi Menggunakan Fotokatalis TiO₂. *AMINA*, 5(2), 72-80.
- Novitasari, D. A. A., Triyanto, D., & Nirmala, I. (2018). Rancang Bangun Sistem Monitoring pada Limbah Cair Industri Berbasis Mikrokontroler dengan Antarmuka Website. *Jurnal Coding, Sistem Komputer Untan*, 6(3), 43–53.
- Nugroho, I.A. (2011) *Deposisi Lapisan Titania dan Pembuatan Sistem Pengolah Air Limbah Organik Menggunakan Material Fotokatalis Titania (TiO₂)*, Skripsi Fisika, Undip Semarang
- Nurillahi, R., Halimah, D. N., Apriliani, D. G., & Fatimah, I. (2018). Pengolahan Limbah Batik Cair menggunakan Fotokatalis TiO₂-Abu Vulkanik Desa Wukirsari Yogyakarta. *Khazanah: Jurnal Mahasiswa*, 10(2).
- Prastika, A., & Alamsah, I. (2022). Kinetika Adsorpsi Asam Tanat Pada Fotokatalis SiO₂/TiO₂. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 6(1), 14-22.
- Purnamawati, K. Y., Suyasa, I. B., & Mahardika, I. G. (2015). Penurunan Kadar Rhodamin B dalam Air Limbah dengan Biofiltrasi Sistem Tanaman. *Ecotrophic*, 9(2), 46-51.
- Purnawan, C., Patiha, dan A.A. Qodri. (2011). Fotodegradasi Zat Warna Remazol Yellow FG dengan Fotokatalis Komposit TiO₂/SiO₂. *Jurnal Ekosains*, 1(3): 17-24
- Rahman, D. Y., & Sulistyowati, R. (2023). Aplikasi fotokatalis TiO₂ dan alternatifnya untuk degradasi pewarna sintesis dalam limbah cair. *Environmental Science Journal (Esjo): Jurnal Ilmu Lingkungan*, 89-105.
- Rahmawati, A., & Kusumawati, D. H. (2020). KOMPOSIT TiO₂/rGO SEBAGAI FOTOKATALIS UNTUK MENDEGRADASI ZAT WARNA. *Inovasi Fisika Indonesia*, 9(2), 78-84.
- Riyani, K., & Setyaningtyas, T. (2010). Penurunan Kadar Sianida Dalam Limbah Cair Tapioka Menggunakan Fotokatalis TiO₂. *Molekul*, 5(1), 50-55.
- Rohman, T., Irwan, A., & Rahmi, Z. (2018). Penurunan Kadar Amoniak dan Fosfat Limbah Cair Tahu Secara Foto Katalitik Menggunakan TiO₂ dan H₂O₂. *Jurnal Sains Natural*, 8(2), 87.
- Slamet, Ellyana, M., Bismo, S. (2008). *Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan Fotokatalis TiO₂ melalui Metode Sol Gel dan Aplikasinya untuk Penyisihan Fenol*. Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Sucahya, T. N., Permatasari, N., & Nandiyanto, A. B. D. (2016). Fotokatalis untuk pengolahan limbah cair. *Jurnal integrasi proses*, 6(2).
- Swandayani, R. E., & Sulastri, M. P. (2020). Identifikasi Komposisi dan Jenis Limbah Cair di Gili Air Kabupaten Lombok Utara. *Naturalis: Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 9(2), 143-147.
- Tussaã, R. (2015). Sintesis material fotokatalis TiO₂ untuk penjernihan limbah tekstil. *Jurnal Fisika Unand*, 4(1).
- Zhang, Y. et al., (2017). Adsorption Equilibrium and Kinetics of the Removal of Ammoniacal Nitrogen by Zeolite X/Activated Carbon Composite Synthesized from Elutrilithe. *Journal of Chemistry. Hindawi Limited*.