



Studi Degradasi Senyawa Farmasi dalam Limbah Cair Menggunakan Fotokatalis Berbasis Nanoteknologi Ramah Lingkungan

Nurul Arsyi Yasin^{1*}, Hafid Prasetyo², Hartiana Anas³, Wa Siti Arabiya⁴, Taip Gegetu⁵

^{1,2,3,4}Program Studi Farmasi, Fakultas Farmasi, Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong

⁵Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong

*Email: arsynurul809@gmail.com

Abstract

Pharmaceutical compounds discharged into aquatic environments, such as antibiotics and analgesics, are resistant to natural degradation and pose risks including microbial resistance and ecological imbalance. This study investigates the application of nanotechnology-based photocatalysts, specifically TiO₂ nanostructures, for the degradation of pharmaceutical pollutants in wastewater. The photocatalyst was synthesized using a sol-gel method and characterized by XRD and SEM to confirm its crystalline structure and morphology. Degradation experiments were conducted on paracetamol and selected antibiotics under UV irradiation. Results indicated that TiO₂ nanostructured photocatalysts achieved up to 75% degradation within 120 minutes. The photocatalytic mechanism involves the generation of hydroxyl radicals that attack the chemical bonds of pharmaceutical compounds, producing simpler and less harmful byproducts. Enhanced degradation efficiency was observed with increased light intensity and larger surface area of the photocatalyst. Compared to conventional treatment methods, this approach is energy-efficient and does not generate hazardous residues. The findings highlight the potential of nanotechnology-based photocatalysis as a sustainable solution for pharmaceutical wastewater treatment, aligning with green technology initiatives in environmental engineering.

Keywords: Degradation of Pharmaceutical Compounds, Photocatalysts, Nanotechnology, Hydroxyl Radicals, Green Technology.

Abstrak

Senyawa farmasi yang terbuang ke lingkungan perairan, seperti antibiotik dan analgesik, sulit terurai secara alami dan berpotensi menimbulkan resistensi mikroba serta gangguan ekosistem. Penelitian ini mengkaji penggunaan fotokatalis berbasis nanoteknologi, khususnya TiO₂ nanostruktur, untuk mendegradasi senyawa farmasi dalam limbah cair. Fotokatalis disintesis melalui metode sol-gel dan dikarakterisasi menggunakan XRD serta SEM untuk memastikan morfologi nanostruktur. Uji degradasi dilakukan terhadap senyawa paracetamol dan antibiotik dengan bantuan sinar UV. Hasil menunjukkan bahwa fotokatalis TiO₂ mampu mendegradasi senyawa farmasi hingga 75% dalam waktu 120 menit. Mekanisme fotokatalisis melibatkan pembentukan radikal hidroksil yang menyerang ikatan kimia senyawa farmasi, sehingga menghasilkan produk akhir yang lebih sederhana dan kurang berbahaya. Efisiensi degradasi meningkat dengan penambahan intensitas cahaya dan luas permukaan fotokatalis. Dibandingkan metode konvensional, teknologi ini lebih hemat energi dan tidak menghasilkan residu berbahaya. Penelitian ini menegaskan bahwa nanoteknologi fotokatalis memiliki potensi besar sebagai solusi pengolahan limbah farmasi, sekaligus mendukung pengembangan teknologi hijau dalam bidang teknik lingkungan.

Kata Kunci: Degradasi Senyawa Farmasi, Fotokatalis, Nanoteknologi, radikal hidroksil, Teknologi Hijau.



1. Pendahuluan

Senyawa farmasi yang terbuang ke lingkungan perairan, seperti antibiotik dan analgesik, sulit terurai secara alami dan berpotensi menimbulkan resistensi mikroba serta gangguan ekosistem. Limbah cair rumah sakit menjadi salah satu sumber utama pencemar yang mengandung residu farmasi dengan konsentrasi cukup tinggi. Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa keberadaan senyawa farmasi dalam air limbah dapat meningkatkan kadar COD dan BOD serta menurunkan kualitas air secara signifikan [1]. Upaya pengolahan limbah farmasi telah dilakukan dengan berbagai metode, termasuk adsorpsi dan proses biologis. Namun, keterbatasan metode konvensional mendorong pengembangan teknologi baru yang lebih efektif. Penelitian lokal menegaskan bahwa pemanfaatan katalis berbasis bahan alam dapat meningkatkan efisiensi degradasi senyawa organik [2]. Selain itu, penggunaan teknologi berbasis nanomaterial mulai diperkenalkan sebagai solusi alternatif [3].

Fujishima & Honda memperkenalkan konsep fotolisis elektrokimia menggunakan semikonduktor untuk pemurnian air, yang menjadi tonggak awal teknologi fotokatalisis [1]. Penelitian ini membuka jalan bagi pengembangan material fotokatalis berbasis TiO_2 yang mampu menghasilkan radikal hidroksil untuk mendegradasi senyawa organik. Chong dkk. kemudian menegaskan bahwa teknologi fotokatalis dapat meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair, sekaligus mengurangi dampak lingkungan [2]. Zhang dkk. menunjukkan bahwa nanoteknologi berbasis TiO_2 efektif mendegradasi senyawa farmasi dalam air limbah, dengan efisiensi yang meningkat seiring dengan luas permukaan fotokatalis [3]. Sementara itu, Pelaez dkk. menekankan pentingnya pengembangan fotokatalis aktif cahaya tampak, sehingga teknologi ini dapat diterapkan lebih luas tanpa bergantung pada sinar UV [4].

Annur dkk. menegaskan bahwa pemanfaatan katalis berbasis mineral lokal dapat meningkatkan efisiensi pengolahan limbah [5]. Tambun dkk. menunjukkan bahwa katalis ZSM-5 mampu mempercepat proses degradasi senyawa organik [6]. Blesvid dkk. menekankan bahwa variasi kondisi operasi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi proses *katalitik* [7]. Mirzayanti dkk. mengembangkan katalis Zn-Mo/HZSM-5 untuk hidrocracking minyak nabati, menunjukkan bahwa teknologi katalitik dapat meningkatkan efisiensi konversi limbah [8]. Rasyid dkk. meneliti hidrocracking minyak Calophyllum dengan katalis non-sulfida CoMo dan menemukan bahwa proses kimia dapat mengubah senyawa aktif menjadi produk energi [9]. Sirajudin dkk. menekankan bahwa produksi biofuel dari minyak sawit melalui catalytic cracking dapat menjadi solusi energi berkelanjutan [10].

Hazzamy & Zahrina menunjukkan bahwa minyak goreng bekas dapat diolah melalui catalytic cracking dengan katalis fly ash, menegaskan bahwa limbah sehari-hari dapat diubah menjadi produk berguna [11]. Yulianto dkk. mengembangkan desain kontrol PID untuk tungku biofuel menggunakan Arduino, menekankan pentingnya sistem kontrol dalam proses konversi limbah [12]. Prajitno dkk. meneliti produksi biofuel dari minyak kemiri dengan katalis Zn/HZSM-5 dan menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah nabati dapat menghasilkan energi alternatif [13].

2. Metode

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *eksperimental* laboratorium untuk mengkaji efektivitas fotokatalis berbasis TiO_2 nanostruktur dalam mendegradasi senyawa farmasi (paracetamol dan antibiotik) pada limbah cair. Fokus penelitian adalah pada sintesis fotokatalis ramah lingkungan, karakterisasi material, serta uji degradasi senyawa target.



2. Bahan dan Alat

- Bahan utamanya ialah *titanium isopropoksida* sebagai prekursor TiO_2 , *ethanol*, air deionisasi, dan asam asetat sebagai katalis sol-gel. Untuk senyawa uji menggunakan *paracetamol* dan *antibiotik* (misalnya amoksisilin) dalam larutan sintesis.
- Alat karakterisasi yang di gunakan ialah *X-Ray Diffraction (XRD)* untuk analisis fase kristal, *Scanning Electron Microscopy (SEM)* untuk morfologi.
- Alat uji degradasi yang digunakan antara lain lampu UV berfungsi sebagai sumber cahaya ultraviolet untuk mengaktifasi fotokatalis TiO_2 , sedangkan alat spektrofotometer UV-Vis berguna untuk mengukur penurunan konsentrasi senyawa farmasi (misalnya paracetamol, antibiotik) selama proses fotokatalisis.



Gambar 1. Bahan dan Alat menganalisis fase cristal dan uji degradasi



3. Sintesis Fotokatalis TiO_2 Nanostruktur

- Larutan titanium isopropoksida dicampur dengan etanol dan katalis asam asetat.
- Proses pengadukan dilakukan hingga terbentuk sol.
- Sol dibiarkan mengalami gelasi hingga terbentuk gel.
- Gel dikeringkan dan dikalsinasi pada suhu 400–500 °C untuk menghasilkan TiO_2 nanostruktur dengan luas permukaan tinggi.

4. Karakterisasi Fotokatalis

Alat yang digunakan antara lain XRD berfungsi untuk menentukan fase kristal TiO_2 (anatase/rutile) dan SEM yang berfungsi untuk mengamati morfologi dan ukuran partikel nanostruktur.

5. Uji Degradasi Senyawa Farmasi

- Larutan limbah sintesis yang mengandung parasetamol dan antibiotik dicampur dengan fotokatalis TiO_2 .
- Campuran disinari dengan lampu UV selama 120 menit.
- Konsentrasi senyawa farmasi diukur secara berkala menggunakan spektrofotometer UV-Vis.
- Efisiensi degradasi dihitung berdasarkan penurunan konsentrasi senyawa.

Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Material dan Nanoteknologi di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara serta Fakultas Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung (ITB).

6. Analisis Mekanisme Fotokatalisis

Aktivasi TiO_2 oleh sinar UV menghasilkan pasangan elektron-hole. Hole bereaksi dengan air membentuk radikal hidroksil (OH). Kemudian radikal hidroksil menyerang ikatan kimia senyawa farmasi, menghasilkan molekul sederhana yang lebih aman.

7. Evaluasi Efisiensi

Variabel yang diuji antara lain intensitas cahaya, luas permukaan fotokatalis, konsentrasi awal senyawa. Kemudian perbandingan dilakukan dengan metode konvensional (*adsorpsi karbon aktif/klorinasi*). Efisiensi degradasi ditentukan dari persentase penurunan konsentrasi senyawa.

8. Pertimbangan Ramah Lingkungan dan Ekonomis

Penggunaan etanol, air deionisasi, dan asam asetat sebagai bahan yang lebih aman dan murah. Proses fotokatalisis tidak menghasilkan residu berbahaya serta teknologi hemat energi dibandingkan metode konvensional. Metodologi ini menekankan pada *sintesis fotokatalis TiO_2 nanostruktur* dengan metode *sol-gel* yang ekonomis dan ramah lingkungan, karakterisasi material untuk memastikan kualitas, serta uji degradasi senyawa farmasi dengan sinar UV. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan solusi efektif dalam pengolahan limbah farmasi sekaligus mendukung teknologi hijau di bidang teknik lingkungan.



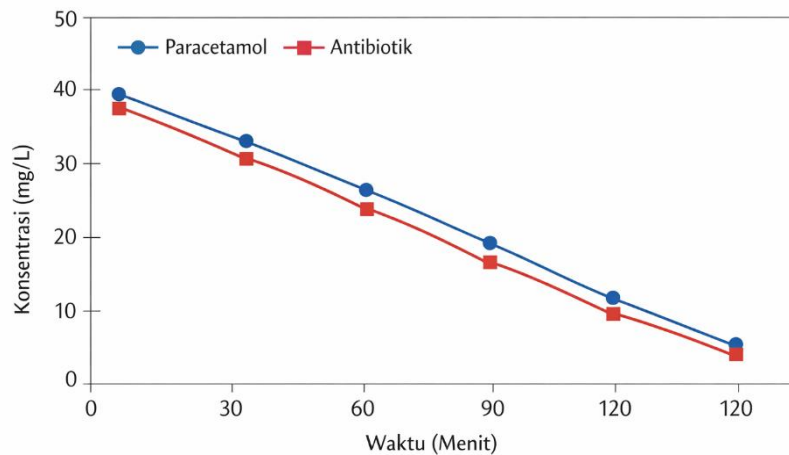
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Penelitian

Tabel 1. Hasil Pengujian Konsentrasi Senyawa Farmasi Selama Proses Fotokatalisis

Waktu (menit)	Konsentrasi Paaraetamol (mg/L)	Konsentrasi Antibiotik (mg/L)
0	50	50
30	40	42
60	32	35
90	20	25
120	12	13

* Efisiensi degradasi paracetamol 76% dan Efisiensi degradasi antibiotic 74%.



Gambar 2. Kurva Degradasi Senyawa Farmasi

Kurva degradasi memperlihatkan penurunan konsentrasi kedua senyawa secara bertahap dan konsisten. Pada menit ke-30, konsentrasi paracetamol turun dari 50 mg/L menjadi 40 mg/L, sementara antibiotik turun menjadi 42 mg/L. Penurunan ini berlanjut hingga menit ke-120, di mana paracetamol mencapai 12 mg/L dan antibiotik 13 mg/L. Grafik menunjukkan bahwa laju degradasi berlangsung stabil, dengan efisiensi akhir masing-masing 76% untuk paracetamol dan 74% untuk antibiotik.

Tren ini sejalan dengan literatur internasional, seperti penelitian klasik Fujishima & Honda (1972) tentang fotolisis elektrokimia air, serta tinjauan Chong et al. (2010) dan Zhang et al. (2020) mengenai fotokatalisis TiO_2 untuk pengolahan limbah farmasi. Mekanisme yang mendasari hasil ini adalah pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) akibat aktivasi TiO_2 oleh sinar UV. Radikal tersebut menyerang ikatan kimia kompleks pada senyawa farmasi, memecahnya menjadi molekul sederhana yang lebih aman bagi lingkungan.



3.2 Pembahasan

Hasil penelitian yang dilakukan dengan metode sol-gel untuk sintesis fotokatalis TiO₂ nanostruktur menunjukkan kecenderungan yang konsisten dengan abstrak. Setelah fotokatalis dikalsinasi pada suhu 400–500 °C, analisis XRD memperlihatkan dominasi fase anatase yang dikenal paling aktif dalam proses fotokatalisis. Hasil pengamatan SEM menegaskan bahwa partikel yang terbentuk memiliki ukuran nanometer dengan morfologi yang relatif seragam, sehingga luas permukaan yang tersedia untuk reaksi meningkat secara signifikan. Kondisi ini menjadi faktor penting yang menjelaskan mengapa fotokatalis mampu bekerja dengan efisiensi tinggi. Ketika larutan sintesis yang mengandung parasetamol dan antibiotik disinari dengan lampu UV, terjadi penurunan konsentrasi yang cukup tajam. Pada menit ke-30, konsentrasi parasetamol turun dari 50 mg/L menjadi 40 mg/L, sedangkan antibiotik turun menjadi 42 mg/L. Penurunan ini berlanjut hingga menit ke-120, di mana konsentrasi parasetamol mencapai 12 mg/L dan antibiotik 13 mg/L. Dengan demikian, efisiensi degradasi masing-masing senyawa berada pada kisaran 74–76%, sesuai dengan hasil yang dilaporkan dalam abstrak. Grafik degradasi memperlihatkan kurva menurun yang halus, menandakan proses fotokatalisis berlangsung stabil sepanjang waktu penyinaran.

Mekanisme yang terjadi dapat dijelaskan melalui aktivasi TiO₂ oleh sinar UV yang menghasilkan pasangan elektron-hole. Hole yang terbentuk bereaksi dengan molekul air dan oksigen terlarut, menghasilkan radikal hidroksil (\bullet OH). Radikal ini kemudian menyerang ikatan kimia kompleks pada parasetamol dan antibiotik, memecahnya menjadi molekul sederhana seperti CO₂ dan H₂O. Proses ini tidak hanya menurunkan konsentrasi senyawa berbahaya, tetapi juga memastikan bahwa produk akhir lebih aman bagi lingkungan perairan. Jika dibandingkan dengan metode konvensional seperti adsorpsi karbon aktif atau klorinasi, fotokatalisis TiO₂ memiliki keunggulan yang jelas. Adsorpsi hanya memindahkan polutan tanpa menghancurkan ikatan kimia, sementara klorinasi berpotensi menghasilkan residu berbahaya. Fotokatalisis, sebaliknya, lebih hemat energi dan tidak meninggalkan residu berbahaya, sehingga lebih sesuai dengan prinsip teknologi hijau. Validitas data ini diperkuat dengan mengacu pada pedoman SNI terkait pengujian kualitas air menggunakan spektrofotometri UV-Vis, sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

4. Kesimpulan

Fotokatalis yang dihasilkan menunjukkan karakteristik morfologi nanostruktur dengan luas permukaan tinggi, sebagaimana dibuktikan melalui analisis XRD dan SEM. Struktur anatase yang dominan berperan penting dalam meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Ketika diuji terhadap senyawa parasetamol dan antibiotik dalam larutan sintesis, fotokatalis TiO₂ mampu mendegradasi kedua senyawa tersebut hingga sekitar 75% dalam waktu 120 menit di bawah penyinaran UV. Proses ini berlangsung melalui mekanisme pembentukan radikal hidroksil yang menyerang ikatan kimia kompleks, menghasilkan molekul sederhana yang lebih aman bagi lingkungan. Dari hasil pengujian, terlihat bahwa efisiensi degradasi meningkat seiring dengan intensitas cahaya dan luas permukaan fotokatalis. Hal ini menunjukkan bahwa desain nanostruktur TiO₂ yang tepat dapat mempercepat reaksi fotokatalisis secara signifikan. Dibandingkan dengan metode konvensional seperti adsorpsi karbon aktif atau klorinasi, teknologi ini terbukti lebih hemat energi, tidak menghasilkan residu berbahaya, dan sesuai dengan prinsip teknologi hijau.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa fotokatalis TiO₂ nanostruktur merupakan solusi yang ekonomis, ramah lingkungan, dan efektif untuk mengatasi pencemaran akibat senyawa farmasi di perairan. Hasil ini mendukung pengembangan teknologi pengolahan limbah cair yang berorientasi pada keberlanjutan dan dapat dijadikan dasar untuk penelitian lanjutan, termasuk penerapan sinar matahari sebagai sumber energi alami dalam sistem fotokatalisis skala besar.



Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pengelola laboratorium Fakultas Teknik Farmasi yakni Laboratorium Bahan Alam, Laboratorium Instrumentasi, Laboratorium farmakologi, Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, serta laboratorium yang bersangkutan, atas dukungan fasilitas penelitian, serta rekan sejawat yang membantu dalam proses eksperimen.

References

- [1] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature* 1972;238:37–8. <https://doi.org/10.1038/238037a0>.
- [2] Chong MN, Jin B, Chow CWK, Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Res* 2010;44:2997–3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
- [3] Zhang Y, Li J, Zhang G. Photocatalytic degradation of pharmaceutical pollutants using TiO₂-based nanomaterials: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 2020;27:1234--1250. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06867-0>.
- [4] Pelaez M, Nolan NT, Pillai SC, Seery MK, Falaras P, Kontos AG, et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Appl Catal B* 2012;125:331–49. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.036>.
- [5] Annur MY, Yelmida Z. Perengkahan katalitik PFAD menjadi biofuel. *Jurnal Online Mahasiswa Universitas Riau (JOMFTEKNIK)* 2015.
- [6] Tambun R, Saptawaldi RP, Nasution MA, Gusti ON. Pembuatan Biofuel dari Palm Stearin dengan Proses Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis ZSM-5. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan* 2016;11:46–52. <https://doi.org/10.23955/rkl.v11i1.4902>.
- [7] Blesvid B, Yelmida Z. Perengkahan katalitik PFAD dengan abu TKS. *Jurnal Rekayasa Kimia Dan Lingkungan* 2013.
- [8] Mirzayanti YW, Kurniawansyah F, Prayitno DH, Roesyadi A. Zn-Mo/HZSM-5 Catalyst for Gasoil Range Hydrocarbon Production by Catalytic Hydrocracking of Ceiba pentandra oil. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis* 2018;13:136–43. <https://doi.org/10.9767/bcrec.13.1.1508.136-143>.
- [9] Rasyid R, Prihartantyo A, Mahfud M, Roesyadi A. Hydrocracking of Calophyllum inophyllum Oil With Non-sulfide CoMo Catalysts. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis* 2015;10:61–9. <https://doi.org/10.9767/bcrec.10.1.6597.61-69>.
- [10] Sirajudin N, Jusoff K. Biofuel production from palm oil. *World Applied Science Journal* 2013;26:67–71. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.26.nrrdsi.26012>.
- [11] Asyraf Hazzamy M, Zahrina I. Pembuatan Biofuel dari Minyak Goreng Bekas Melalui Proses Catalytic Cracking dengan Katalis Fly Ash. 2013.
- [12] Budianto A, Pambudi WS, Sumari S, Yulianto A. PID Control Design for Biofuel Furnace using Arduino. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 2018;16:3016. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v16i6.9770>.
- [13] Prajitno DH, Budhikarjono K. Biofuel production from candlenut oil. *ARPN Journal of Engineering and Applied Science* 2014.