



Sintesis Senyawa Koordinasi dan Aplikasinya dalam Fotokatalisis Polutan Organik: Tinjauan Terhadap Limbah Pewarna Sintetik dan Farmasi (Antibiotik)

Fitriyana, Ramadan Hasyim, Illkha Wimaz, Laila Roesma Ayu, Auliya Zahra Isnanda Putri, Nakhwah Nurnafi'ah

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta, 55281
Email: 23106030049@student.uin-suka.ac.id

Abstrak. Pencemaran lingkungan perairan akibat limbah polutan organik, khususnya pewarna sintetik industri tekstil dan residu antibiotik farmasi, telah menjadi permasalahan global mendesak karena sifatnya yang persisten, toksik, serta sulit didegradasi secara alami. Tinjauan ini bertujuan menganalisis secara komprehensif peran senyawa koordinasi, termasuk polimer koordinasi dan *metal-organic frameworks* (MOFs), sebagai material fotokatalitik generasi baru dalam mengatasi degradasi limbah kompleks tersebut. Melalui metode tinjauan literatur sistematis terhadap berbagai basis data ilmiah bereputasi, ditemukan bahwa efisiensi fotokatalitik sangat bergantung pada hubungan antara struktur, logam pusat, dan jenis ligan. Hasil analisis menunjukkan bahwa pemilihan logam transisi dan lantanida seperti Cd, Co, Zn, Cu, Hf, dan Ce, yang dikombinasikan dengan ligan organik terkonjugasi, mampu menyesuaikan celah pita energi untuk mengoptimalkan penyerapan cahaya. Berbagai studi melaporkan mekanisme ini berhasil mendegradasi polutan seperti *methylene blue* dan siprofloksasin dengan efisiensi mencapai lebih dari 90% melalui pembentukan spesies radikal reaktif. Meskipun menawarkan fleksibilitas desain struktural unggul, tantangan terkait kompleksitas sintesis dan stabilitas material setelah penggunaan berulang masih menjadi celah penelitian utama. Oleh karena itu, arah penelitian masa depan harus difokuskan pada pengembangan strategi modifikasi material pada produksi skala besar dan ketahanan kimia jangka panjang guna memastikan keberlanjutan aplikasi pengolahan air limbah.

Kata kunci: Senyawa Koordinasi, Fotokatalisis, Pewarna Sintesis, Antibiotik, Degradasi Polutan Organik

Abstract: Environmental water pollution caused by organic pollutants, specifically synthetic dyes from the textile industry and pharmaceutical antibiotic residues, has become a pressing global issue due to their persistent, toxic nature and resistance to natural degradation. This review aims to comprehensively analyze the role of coordination compounds, including coordination polymers and metal-organic frameworks (MOFs), as next-generation photocatalytic materials for the degradation of such complex wastes. Through a systematic literature review of various reputable scientific databases, it was found that photocatalytic efficiency significantly depends on the correlation between structure, central metals, and ligand types. Analysis reveals that the selection of transition metals and lanthanides—such as Cd, Co, Zn, Cu, Hf, and Ce—combined with conjugated organic ligands, enables band gap tuning to optimize light absorption. Various studies report that this mechanism successfully degrades pollutants like methylene blue and ciprofloxacin with efficiencies exceeding 90% through the generation of reactive radical species. While offering superior structural design flexibility, challenges regarding synthesis complexity and material stability after repeated use remain major research gaps. Consequently, future research directions should focus on developing material modification strategies for large-scale production and long-term chemical durability to ensure the sustainability of wastewater treatment applications.

Keyword: Coordination compounds, photocatalysis, synthetic dyes, antibiotics, organic pollutant degradation.

Pendahuluan

Pencemaran air akibat polutan organik, khususnya limbah pewarna industri tekstil dan limbah farmasi, telah menjadi permasalahan lingkungan global yang mendesak untuk diatasi. Industri tekstil berkontribusi signifikan terhadap pencemaran air dengan membuang sekitar 10% hingga 20% dari total pewarna yang digunakan dalam proses produksi ke badan air, sementara lebih dari 70 juta ton pewarna sintetik diproduksi setiap tahun secara global (Kathing & Saini, 2022; Yuan et al., 2024). Dampak negatif pewarna organik terhadap lingkungan sangat kompleks, mengubah kualitas air, mengurangi kadar oksigen, membahayakan organisme akuatik, dan mengganggu rantai makanan. Proses pewarnaan basah seperti *scouring*, *bleaching*, *dyeing*, dan *finishing* bertanggung jawab atas 70-80% pencemaran air di sektor tekstil, dengan satu ton kain yang diwarnai dapat menghasilkan 200 ton air limbah yang sering mengandung logam

berat, formaldehida, dan amina aromatik (Singh et al., 2025). Sifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik dari banyak pewarna sintetik menimbulkan ancaman serius bagi kesehatan manusia dan ekosistem akuatik, terutama karena resistensi mereka terhadap biodegradasi yang menyebabkan polusi jangka panjang di air, tanah, dan atmosfer (Hoque et al., 2024).

Selain limbah pewarna, kontaminasi antibiotik di lingkungan perairan juga menjadi tantangan kritis yang memerlukan perhatian serius. Dari sekitar 30.300 ton antibiotik yang dikonsumsi manusia setiap tahun secara global, diperkirakan 9.500 ton (31%) dilepaskan ke sistem sungai dan 3.250 ton (11%) mencapai lautan atau endapan pedalaman dunia. Keberadaan antibiotik dalam air permukaan menimbulkan risiko terhadap ekosistem akuatik dan kesehatan manusia karena toksisitasnya dan pengaruhnya terhadap resistensi antimikroba (Raina et al., 2025). *World Health Organization* (WHO) telah mengakui

resistensi antimikroba (AMR) sebagai ancaman global kritis, dengan proyeksi bahwa infeksi bakteri resisten dapat menjadi penyebab utama kematian global pada tahun (O'Sullivan et al., 2024). Permasalahan ini sangat mengkhawatirkan karena antibiotik dalam sistem air alami, bahkan pada konsentrasi subtherapeutic kronis, telah terbukti mengurangi keragaman mikroba, meningkatkan keberadaan gen resistensi, dan berpotensi berdampak pada kesehatan ikan dan alga (Raina et al., 2025).

Metode konvensional pengolahan air limbah seperti filtrasi membran, koagulasi-flokulasi, dan proses biologis seringkali tidak efektif dalam mendegradasi polutan organik kompleks ini karena sifatnya yang persisten dan non-biodegradable (Kathing & Saini, 2022). Proses oksidasi lanjut (*Advanced Oxidation Processes/AOPs*) telah muncul sebagai prosedur pengolahan yang dirancang untuk menghilangkan bahan organik dalam air dan air limbah melalui oksidasi dengan radikal hidroksil yang sangat reaktif (Hübner et al., 2024). Di antara berbagai metode AOP, fotokatalisis telah menarik perhatian besar sebagai teknologi yang menjanjikan karena dapat mendegradasi polutan organik menjadi air, karbon dioksida, atau molekul kecil lainnya dengan kondisi reaksi yang ringan, proses sederhana, dan ramah lingkungan (Natarajan et al., 2021). Fotokatalisis menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan metode pengolahan konvensional, termasuk kemampuan untuk mineralisasi lengkap polutan menjadi senyawa tidak berbahaya, tidak menghasilkan polutan sekunder, dan dapat dioperasikan pada suhu kamar dengan memanfaatkan energi cahaya (Iyyappan et al., 2024).

Senyawa koordinasi, polimer koordinasi dan *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) telah muncul sebagai material fotokatalitik generasi baru yang sangat potensial untuk degradasi polutan organik (Wu et al., 2023). MOFs menunjukkan perilaku seperti semikonduktor di bawah iradiasi cahaya, di mana pusat logam dapat bertindak sebagai katalis situs tunggal untuk fotokatalisis, dan ligan organik dapat bertindak sebagai antena untuk memanen energi dan kemudian mentransfernya ke situs logam aktif (Ren et al., 2025). Keunggulan utama senyawa koordinasi dan MOFs sebagai fotokatalis meliputi luas permukaan yang tinggi, struktur berpori yang teratur, dan kombinasi yang dapat disesuaikan antara nodus logam dan ligan organik (Ren et al., 2025). Energi celah pita antara material ini dapat dengan mudah disesuaikan dengan mengubah heteroatom atau melalui strategi seperti doping, pembentukan *heterojunction*, dan desain nanokomposit, memungkinkan optimalisasi penyerapan cahaya dan peningkatan efisiensi pemisahan muatan (Garcia-Vargas et al., 2023).

Meskipun telah banyak penelitian yang mengkaji senyawa koordinasi sebagai fotokatalis, belum ada tinjauan komprehensif yang secara sistematis membandingkan efektivitas berbagai logam pusat dan jenis ligan dalam degradasi limbah pewarna dan farmasi (Wu et al., 2023). Selain itu, evaluasi menyeluruh terhadap mekanisme fotokatalisis, kondisi operasi optimal, serta kelebihan dan keterbatasan masing-masing sistem masih terbatas (Garcia-Vargas et al., 2023). Pemahaman mendalam tentang hubungan struktur-aktivitas dalam senyawa koordinasi sangat

penting untuk merancang material fotokatalitik yang lebih efisien dan dapat diaplikasikan pada skala besar.

Tujuan Penelitian

1. Meninjau peran senyawa koordinasi (polimer koordinasi dan MOF) sebagai fotokatalis dalam degradasi limbah pewarna dan farmasi (antibiotik).
2. Menganalisis hubungan struktur-sifat-kinerja fotokatalitik senyawa koordinasi.
3. Membandingkan efisiensi degradasi berbagai polutan organik di bawah sumber cahaya yang berbeda.
4. Mengidentifikasi kelebihan, kelemahannya, dan celah penelitian untuk pengembangan fotokatalis yang berkelanjutan.

Bahan dan Metode

Bahan Penelitian

Sumber literatur yang digunakan dalam review ini adalah artikel atau jurnal ilmiah yang membahas sintesis senyawa koordinasi dan aplikasinya sebagai fotokatalis dalam degradasi polutan organik, khususnya limbah pewarna sintesis dan senyawa farmasi (antibiotik). Literatur yang digunakan berfokus pada jurnal penelitian yang relevan dengan hubungan antara struktur koordinasi, sifat material, dan kinerja fotokatalisis. Database literatur yang digunakan meliputi *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *ACS Publications*, *RSC Publishing*, *Wiley Online Library*, dan *Google Scholar* sebagai alat pendukung untuk penelusuran awal. Database ini dipilih karena menyediakan publikasi ilmiah yang bereputasi dan banyak digunakan dalam kimia koordinasi dan studi material fungsional. Kriteria inklusi untuk jurnal dalam tinjauan ini meliputi artikel atau jurnal penelitian yang membahas senyawa koordinasi, polimer koordinasi, atau kerangka logam-organik (MOF) sebagai fotokatalis yang berisi data tentang degradasi limbah pewarna atau antibiotik serta menyajikan karakterisasi struktur dan sifat material yang relevan. Literatur yang diprioritaskan berasal dari publikasi dalam 10 tahun terakhir dan diterbitkan di jurnal nasional terakreditasi atau jurnal internasional bereputasi. Artikel ulasan, prosiding konferensi, dan publikasi yang tidak secara langsung membahas struktur senyawa koordinasi dengan aktivitas fotokatalisis dikecualikan.

Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat keras, seperti komputer atau laptop, untuk mencari dan memproses data literatur. Perangkat lunak yang digunakan meliputi *Microsoft Word* untuk menulis, menyusun manuskrip, dan mengolah tabel data; *Mendeley* atau *Zotero* untuk mengelola referensi dan kutipan; dan internet untuk mengakses basis data ilmiah seperti *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *ACS Publications*, *RSC Publishing*, *Wiley Online Library*, dan *Google Scholar*. Selain itu, perangkat lunak pembaca dokumen (pembaca *PDF*) digunakan untuk analisis mendalam terhadap artikel jurnal yang dipilih.

Metode Penelitian

1. Metode Analisis Literatur

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis untuk menganalisis perkembangan sintesis senyawa koordinasi dan aplikasinya dalam degradasi fotokatalitik polutan organik, khususnya limbah pewarna sintetis dan antibiotik. Metode analisis literatur dilakukan dengan meninjau secara kritis artikel penelitian relevan yang memenuhi kriteria inklusi. Setiap jurnal dianalisis secara komparatif untuk mengidentifikasi hubungan antara jenis logam pusat, ligan, metode sintesis, dan pengaruhnya terhadap aktivitas fotokatalitik dalam proses degradasi polutan. Analisis difokuskan pada mekanisme fotokatalitik, sumber cahaya yang digunakan, jenis spesies reaktif yang dihasilkan, dan efisiensi degradasi yang dilaporkan, sehingga diperoleh gambaran komprehensif tentang peran senyawa koordinasi dalam aplikasi lingkungan.

2. Metode Pengelompokan Data

Data dikelompokkan berdasarkan kesamaan karakteristik material dan aplikasinya. Data dari setiap artikel dikelompokkan menurut jenis senyawa koordinasi atau material berbasis koordinasi (misalnya, kompleks logam transisi atau kerangka logam-organik), jenis polutan target (pewarna sintetis atau antibiotik), metode sintesis, sumber iradiasi cahaya, dan kinerja fotokatalitik yang dihasilkan. Pengelompokan ini bertujuan untuk memudahkan perbandingan antara material dan mengidentifikasi tren serta hubungan antara metode sintesis, struktur senyawa koordinasi, dan efektivitas fotokatalisis dalam degradasi polutan organik.

Hasil dan Pembahasan

1. Aktivitas Fotokatalisis dalam Degradasi Limbah Pewarna Organik Sintetis

Penggunaan senyawa koordinasi sebagai fotokatalis telah menarik perhatian besar dalam upaya mengatasi pencemaran air yang disebabkan oleh limbah pewarna sintetis dari industri tekstil. Senyawa koordinasi menawarkan keunggulan berupa struktur yang dapat dimodifikasi dan celah pita energi (*band gap*) yang dapat disesuaikan, sehingga mampu meningkatkan efisiensi pemanenan cahaya dan pemisahan muatan selama proses fotokatalisis (Wu et al., 2023). Mekanisme ini memungkinkan pembentukan radikal bebas yang sangat reaktif, yang kemudian mendegradasi molekul pewarna organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya (Garcia-Vargas et al., 2023). Berbagai studi telah menunjukkan variasi efisiensi degradasi yang signifikan tergantung pada jenis ligan dan logam pusat yang digunakan, sebagaimana dirangkum dalam ulasan berikut.

Polimer Koordinasi Cd(II) sebagai Fotokatalis untuk Degradasi Methylene Blue, Rhodamine B, dan Crystal Violet

Pengembangan senyawa koordinasi berbasis logam transisi terus dilakukan untuk memperoleh material fotokatalitik yang memiliki aktivitas tinggi dalam degradasi zat warna organik. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah perancangan

polimer koordinasi dengan struktur tiga dimensi yang stabil dan kemampuan penyerapan cahaya yang memadai. Dalam konteks ini, suatu polimer koordinasi berbasis Cd(II) telah disintesis melalui metode solvotermal dengan memanfaatkan ligan organik multidentat, sehingga membentuk kerangka koordinasi yang teratur dan kuat. Hasil karakterisasi struktural dan optik menunjukkan bahwa material tersebut mendukung pemisahan pasangan elektron-hole secara efektif dan mampu menghasilkan spesies radikal aktif di bawah iradiasi cahaya. Uji fotokatalitik memperlihatkan efisiensi degradasi yang tinggi terhadap berbagai zat warna organik, termasuk *Methylene blue*, *Rhodamine B*, dan *Crystal Violet*, yang masing-masing mengalami penurunan intensitas warna secara signifikan seiring waktu iradiasi. Proses degradasi ini dikaitkan dengan peran radikal hidroksil dan superoksida yang menyerang sistem aromatik dan gugus kromofor pada molekul pewarna, sehingga menyebabkan pemutusan struktur konjugasi yang bertanggung jawab terhadap warna. Kelebihan utama dari material ini terletak pada kinerja fotokatalitiknya yang tinggi serta stabilitas struktur koordinasi selama penggunaan berulang, sementara kelemahannya berkaitan dengan sifat toksik logam Cd(II) yang berpotensi membatasi penerapannya dalam pengelolaan lingkungan berskala besar (Zhao et al., 2023).

Polimer Koordinasi Co(II) sebagai Fotokatalis untuk Degradasi Methylene Blue dan Rhodamine B

Pendekatan lain dalam pengembangan material fotokatalitik untuk degradasi limbah pewarna organik ditunjukkan melalui sintesis polimer koordinasi berbasis logam transisi yang mampu beroperasi di bawah iradiasi cahaya tampak. Dalam hal ini, suatu polimer koordinasi berbasis Co(II) berhasil disintesis melalui metode solvotermal dengan menggunakan ligan *Isophthalic Acid* dan *5-(4-pyridyl)-1H-Tetrazole*, yang menghasilkan struktur koordinasi tiga dimensi dengan pusat logam Co(II) dalam lingkungan koordinasi yang stabil. Karakterisasi kristalografi menunjukkan bahwa kerangka koordinasi yang terbentuk memiliki keteraturan struktural yang baik serta menyediakan situs aktif yang memungkinkan interaksi efektif antara fotokatalis dan molekul pewarna. Uji aktivitas fotokatalitik menunjukkan bahwa material ini mampu mendegradasi pewarna organik seperti *Methylene Blue* dan *Rhodamine B* secara efisien dibawah iradiasi cahaya tampak, yang dikaitkan dengan pembentukan spesies radikal reaktif, terutama radikal superoksida, hasil dari proses transfer elektron yang dipicu oleh eksitasi cahaya. Kelebihan utama dari polimer koordinasi berbasis Co(II) ini terletak pada kemampuannya menyerap cahaya tampak, stabilitas struktural yang baik, serta efisiensi degradasi pewarna yang relatif tinggi tanpa memerlukan sumber cahaya UV. Namun demikian, kelemahannya terletak pada keterbatasan kajian terhadap stabilitas jangka panjang dan performa material dalam kondisi limbah nyata yang lebih kompleks, sehingga masih diperlukan evaluasi lanjutan sebelum diaplikasikan secara luas dalam pengolahan air limbah industri (Li et al., 2024).

Polimer Koordinasi Zn–TIPA sebagai Fotokatalis untuk Degradasi MGO, RhB, Crystal Violet, Fuchsin Basic, dan Methyl Orange

Penelitian oleh Huo et al. (2019) melaporkan sintesis polimer koordinasi baru $\{[Zn(TIPA)(seb)_{0.5}](NO_3)_3 \cdot 5H_2O\}_n$ melalui metode solvotermal menggunakan prekursor $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, ligan tripodal TIPA (*tris(4-(1H-imidazol-1-yl)phenyl)amine*), dan ligan jembatan asam sebaset (H_2seb) dalam campuran pelarut DMF/ H_2O pada suhu 105 derajat Celcius selama tiga hari. Senyawa ini mengkristal dalam grup ruang monoklinik $P2_1/n$ dengan kation Zn^{2+} yang mengadopsi geometri piramida persegi terdistorsi untuk membentuk jaringan diamondoid interpenetrasi dua kali lipat yang stabil hingga suhu 300 derajat Celcius. Proses sintesis ini secara efektif menurunkan band gap ligan TIPA dari 4,1 eV menjadi 3,25 eV melalui interaksi muatan antara kation Zn^{2+} dan ligan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material ini berhasil mendegradasi berbagai pewarna organik seperti *Rhodamine B*, *Crystal Violet*, *Fuchsin Basic*, *Methyl Orange*, dan secara signifikan *Malachite Green Oxalate* (MGO) dalam waktu 35 menit di bawah paparan sinar UV dengan bantuan H_2O_2 . Kelebihan jurnal ini terletak pada keberhasilannya membuktikan penurunan band gap secara teoritis dan eksperimental serta sifat multifungsinya sebagai sensor antibiotik dan adsorben, akan tetapi kelemahannya adalah efisiensi degradasi yang masih sangat bergantung pada penambahan oksidator eksternal (H_2O_2) dan respons cahaya yang terbatas pada spektrum UV saja.

MOF Y–PTC sebagai Fotokatalis untuk Degradasi Methylene Blue dan Methyl Orange

Penelitian oleh Adawiah et al. (2021) melaporkan sintesis kerangka logam-organik (*Metal-Organic Framework*) baru berbasis yttrium, yaitu Y-PTC, melalui metode solvotermal menggunakan campuran pelarut air dan DMF (5:1) pada suhu 170 derajat Celcius selama 24 jam. Struktur ini dibangun menggunakan kation yttrium (Y^{3+}) sebagai pusat logam dan perilen-3,4,9,10-tetrakarboxilat (PTC) sebagai ligan organik sekaligus fotosensitizer. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa Y-PTC memiliki energi celah pita (*band gap*) yang sempit sebesar 2,20 eV, yang memungkinkannya bekerja sangat efektif di bawah paparan cahaya tampak (*visible light*). Dalam pengujian aktivitas fotokatalitik, material ini berhasil mendegradasi pewarna kationik Methylene Blue (MB) dengan efisiensi mencapai 87,55% dan pewarna anionik *Methyl Orange* (MO) sebesar 50,89%. Kelebihan utama jurnal ini adalah keberhasilan pemanfaatan ligan perilen untuk memperluas area penyerapan cahaya ke spektrum tampak serta stabilitas material yang baik dalam air. Namun, kelemahannya terletak pada derajat kristalinitas produk yang masih sangat rendah serta luas permukaan yang relatif kecil yaitu 47,74 m^2/g , yang dapat membatasi jumlah situs aktif untuk reaksi.

Polimer Koordinasi Zn(II) sebagai Fotokatalis untuk Degradasi Rhodamine B dan Methylene Blue

Studi lain yang dilaporkan oleh Liu et al. (2018), membahas mengenai senyawa koordinasi berbasis Zn(II) yang disintesis

dalam bentuk polimer koordinasi dan memiliki struktur kristal teratur. Struktur koordinasi yang terbentuk dikonfirmasi melalui analisis difraksi sinar-X (XRD), FTIR, dan karakterisasi sifat optik, yang mana menunjukkan lingkungan koordinasi Zn(II) yang stabil. Material ini memiliki nilai celah pita yang memungkinkan eksitasi elektron di bawah iradiasi cahaya, sehingga dapat berfungsi sebagai fotokatalis. Dalam aplikasinya, polimer koordinasi Zn(II) ini menunjukkan aktivitas yang baik dalam degradasi zat warna organik seperti *Rhodamine B* dan *Methylene Blue*, di mana proses fotokatalisis terjadi melalui pembentukan pasangan elektron-lubang yang kemudian menghasilkan spesies radikal aktif (Liu et al., 2018). Namun, aktivitas fotokatalisis yang dilaporkan masih bergantung pada kondisi iradiasi tertentu, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi sistem.

Polimer Koordinasi Cu(II) sebagai Fotokatalis untuk Degradasi Methylene Blue dan Rhodamine B

Berbeda dengan penelitian Liu et al., Shi Lu et al (2017). melaporkan sintesis polimer koordinasi berbasis Cu(II) yang dirancang sebagai fotokatalis untuk degradasi zat warna di bawah iradiasi cahaya tampak. Senyawa koordinasi tersebut disintesis menggunakan ligan organik pendonor elektron yang mampu membentuk jaringan koordinasi yang stabil dan mendukung proses transfer muatan. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa struktur koordinasi logam-ligan dan sifat elektronik material memainkan peran penting dalam meningkatkan pemisahan pasangan elektron-lubang. Dalam uji aplikasi, polimer koordinasi Cu(II) yang dikembangkan menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang efektif terhadap degradasi zat warna seperti *Methylene Blue* dan *Rhodamine B* di bawah iradiasi cahaya tampak (Shi et al., 2017). Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan logam pusat dan ligan yang tepat dalam senyawa koordinasi sangat memengaruhi efisiensi fotokatalisis, terutama untuk aplikasi degradasi zat warna berbasis cahaya tampak.

2. Aktivitas Fotokatalisis dalam Degradasi Limbah Antibiotik

Senyawa kompleks atau senyawa koordinasi telah banyak dikaji sebagai material fotokatalitik karena memiliki struktur elektronik yang mampu berinteraksi secara efektif dengan energi cahaya, sehingga berpotensi digunakan dalam degradasi antibiotik di lingkungan perairan (Wang et al., 2023). Keberadaan ion logam transisi sebagai pusat koordinasi memungkinkan terjadinya proses penyerapan cahaya dan transfer muatan antara ligan dan logam yang menghasilkan pasangan elektron-hole aktif (Li et al., 2024). Pasangan muatan ini selanjutnya memicu pembentukan spesies oksidator kuat seperti radikal hidroksil ($\bullet OH$) dan radikal superoksida ($\bullet O_2^-$) yang berperan dalam pemutusan ikatan kimia antibiotik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kurang toksik (Khaleeq et al., 2024). Selain itu, fleksibilitas desain struktur senyawa kompleks, baik dalam bentuk kompleks molekuler, polimer koordinasi, maupun *Metal-Organic Framework* (MOF), memungkinkan

peningkatan efisiensi fotokatalitik dan stabilitas material, sehingga menjadikan senyawa kompleks sebagai kandidat potensial dalam pengolahan limbah antibiotik berbasis fotokatalisis (Zhang et al., 2025).

MOF Porfirin TCPP@UiO-66(Hf) sebagai Fotokatalis Degradasi Ofloxacin

Penelitian yang dilakukan oleh Wang et al., (2023) melaporkan pengembangan fotokatalis berbasis *Metal-Organic Framework* (MOF) porfirin TCPP@UiO-66(Hf) untuk degradasi antibiotik ofloxacin dalam air, dengan pendekatan inovatif yang memanfaatkan keberadaan anion sebagai penguat kinerja fotokatalitik. Katalis disintesis melalui metode one-pot solvothermal menggunakan prekursor HfCl_4 , ligan asam tereftalat (BDC), asam benzoat sebagai modulator, serta penambahan ligan porfirin H_2TCPP dalam variasi konsentrasi, yang secara sengaja menciptakan defek struktural pada kerangka MOF sehingga meningkatkan luas permukaan dan ukuran pori hingga mencapai $1404,7 \text{ m}^2/\text{g}$. Material hasil sintesis kemudian diaplikasikan untuk fotokatalisis degradasi antibiotik ofloxacin di bawah cahaya tampak (UV), di mana sampel optimum TCPP@UiO-66(Hf)-250 menunjukkan efisiensi degradasi lebih dari 96%. Keunggulan utama penelitian ini adalah temuan bahwa anion umum dalam air limbah, seperti SO_4^{2-} , Cl^- , dan HCO_3^- , tidak menghambat reaksi, tetapi justru bertindak sebagai donor elektron, memperkuat transfer muatan pada sistem kompleks koordinasi Hf-TCPP dan meningkatkan pembentukan spesies reaktif seperti $\text{O}_2^{\bullet-}$, $^1\text{O}_2$, dan $\text{SO}_4^{\bullet-}$. Material ini juga menunjukkan stabilitas dan kinerja yang baik pada berbagai jenis air lingkungan serta penggunaan berulang. Namun demikian, keterbatasan penelitian ini meliputi selektivitas katalis terhadap jenis polutan tertentu, penurunan stabilitas pada kondisi asam kuat, adanya konsentrasi anion optimum yang tidak bersifat linier, serta tantangan biaya dan skala produksi akibat penggunaan logam hafnium dan ligan porfirin. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam fotokatalisis lingkungan dengan menawarkan paradigma baru bahwa komponen kompleks air limbah dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kinerja sistem fotokatalitik berbasis senyawa kompleks koordinasi.

MOF Ce(IV) Terdoping Samarium (Sm/MOF-808(Ce)) sebagai Fotokatalis Degradasi Cefaclor

Penelitian oleh Khaleeq et al. (2024) melaporkan sintesis metal-organic framework (MOF) berbasis koordinasi Ce(IV) yang dimodifikasi dengan doping samarium (Sm/MOF-808(Ce)) sebagai fotokatalis untuk degradasi antibiotik cefaclor dalam air. Material disintesis melalui metode hidrotermal termodulasi, diawali dengan pembentukan MOF-808(Ce) dari *Cerium Ammonium Nitrate* dan ligan *Trimesic Acid* (H_3BTC) dalam campuran DMF-asam format pada suhu tinggi, kemudian dilakukan dekorasi Sm dengan menambahkan larutan samarium nitrat (rasio Sm:Ce = 1:9) dan pemanasan lanjutan dalam autoklaf. Aplikasi fotokatalitik menunjukkan bahwa Sm/MOF-808(Ce) mampu mendegradasi 97,7% cefaclor dalam 20 menit

dan mencapai >99% dalam 60 menit di bawah penyinaran UV, melalui pembentukan radikal $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{O}_2^-$ dengan pemisahan muatan lebih efisien akibat peningkatan transfer muatan ligan-logam (LMCT) dan penekanan rekombinasi elektron-hole. Keunggulan sistem ini meliputi aktivitas sangat tinggi, band gap sempit ($\sim 1,76\text{--}1,81 \text{ eV}$), stabilitas struktural yang baik, dan minim pembentukan produk samping berbahaya. Namun, kelemahannya adalah ketergantungan performa pada UV (aktivitas menurun pada cahaya tampak) serta penurunan efisiensi setelah beberapa siklus pemakaian akibat sebagian kolapsnya situs aktif dan penyumbatan pori, sehingga masih diperlukan optimasi untuk aplikasi jangka panjang dan kondisi air nyata.

Ag-TIPA Coordination Polymer untuk Degradasi Antibiotik Ciprofloxacin

Penelitian oleh Ma et al. (2024) memberikan landasan konseptual penting bagi pengembangan fotokatalis berbasis MOF dan senyawa kompleks koordinasi dalam pengolahan limbah farmasi, khususnya antibiotik. Meskipun material yang dikembangkan berupa polimer koordinasi Ag(I)-TIPA dan bukan MOF berpori klasik, struktur tersebut memiliki karakteristik fundamental yang sejalan dengan prinsip desain MOF, yaitu adanya pusat logam terkoordinasi dan ligan organik aromatik yang membentuk jaringan teratur. Studi ini menunjukkan bahwa interaksi koordinasi logam-ligan mampu menciptakan jalur metal-ligand charge transfer (MLCT) yang efektif, sehingga memperluas serapan cahaya dan meningkatkan pemisahan muatan, mekanisme yang juga menjadi kunci dalam fotokatalisis berbasis MOF porfirin, Zr-MOF, maupun Ce-MOF. Keberhasilan Ag-TIPA dalam mendegradasi ciprofloxacin hingga $\sim 94\%$ serta kestabilannya pada rentang pH luas menegaskan bahwa sistem koordinasi logam-N aromatik dapat berfungsi sebagai alternatif atau model penyederhanaan MOF dalam memahami peran situs logam terkoordinasi. Namun, penggunaan logam mulia Ag dan ketergantungan sebagian pada UV menyoroiti tantangan keberlanjutan yang juga dihadapi MOF berbasis logam berat, sehingga penelitian ini memperkuat urgensi eksplorasi MOF berbasis logam transisi atau lantanida yang lebih ekonomis. Dengan demikian, studi ini relevan sebagai rujukan konseptual dalam tinjauan pustaka MOF karena menegaskan bahwa peningkatan kinerja fotokatalitik sangat bergantung pada rekayasa transfer muatan dalam sistem senyawa kompleks terkoordinasi.

Polimer Koordinasi Cu(I)/Cu(II) untuk Fotodegradasi Ciprofloxacin

Penelitian oleh Ren et al. (2023) secara eksplisit memperkuat posisi senyawa kompleks koordinasi sebagai fondasi struktural dan fungsional dalam pengembangan MOF fotokatalitik untuk degradasi antibiotik. Melalui sintesis beberapa kompleks Cu(I)/Cu(II) dengan variasi dimensi struktur (0D hingga 1D), penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi koordinasi, jenis ligan nitrogen aromatik, serta tingkat konjugasi berpengaruh langsung terhadap sifat semikonduktor dan aktivitas

fotokatalitik. Rentang celah pita energi yang relatif sempit (1,71-2,23 eV) pada senyawa-senyawa tersebut sejalan dengan karakteristik MOF fotokatalitik modern, khususnya MOF berbasis Cu, Fe, dan Ce, yang dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan cahaya. Meskipun belum mencapai arsitektur MOF tiga dimensi berpori, hasil penelitian ini memberikan bukti bahwa pengaturan lokal pusat logam dan ligan sudah cukup untuk menghasilkan aktivitas degradasi ciprofloxacin, sehingga mendukung gagasan bahwa MOF dapat dipandang sebagai ekstensi terstruktur dari senyawa kompleks koordinasi diskret. Keterbatasan berupa belum dievaluasinya mekanisme transfer muatan secara mendalam dan stabilitas jangka panjang juga mencerminkan tantangan umum dalam riset MOF fotokatalitik. Oleh karena itu, penelitian ini berfungsi sebagai jembatan konseptual antara kimia koordinasi klasik dan pengembangan MOF fungsional dalam konteks degradasi antibiotik.

Ag/ZIF-8 sebagai Fotokatalis Berbasis Senyawa Koordinasi untuk Degradasi Ciprofloxacin

Penelitian Zhang et al. (2024) mensintesis ZIF-8 berbasis Zn(II) yang terbentuk melalui koordinasi antara ion Zn^{2+} dan ligan 2-metilimidazolat menggunakan metode solvotermal yang kemudian menghasilkan kerangka logam-organik dengan ikatan koordinasi Zn-N yang stabil, struktur kristal yang khas, dan jaringan mikropori seragam yang mendukung difusi molekul antibiotik. Aktivitas fotokatalitik material ini kemudian ditingkatkan melalui modifikasi pasca-sintesis dengan menambahkan nanopartikel Ag melalui proses impregnasi atau reduksi in situ yang menghasilkan pembentukan heterostruktur Ag/ZIF-8 tanpa mengganggu kerangka koordinasi utama ZIF-8. Dalam sistem ini, Ag bertindak sebagai penangkap elektron yang efektif, menekan rekombinasi pasangan elektron-lubang dan meningkatkan pembentukan spesies oksidatif reaktif seperti radikal $\cdot OH$ dan $\cdot O_2^-$ di bawah iradiasi cahaya tampak, yang selanjutnya mendorong degradasi siprofloksasin dengan efisiensi

tinggi. Pendekatan sintesis ini menegaskan bahwa modifikasi pasca-sintesis merupakan strategi efektif untuk meningkatkan fungsi fotokatalitik senyawa koordinasi tanpa merusak struktur dasar MOF. Namun, masih ada keterbatasan dalam mengontrol ukuran dan distribusi nanopartikel Ag dan belum ada studi mendalam tentang stabilitas struktur koordinasi Ag/ZIF-8 setelah penggunaan berulang, sehingga aspek daya tahan material tetap menjadi tantangan yang membutuhkan penelitian lebih lanjut.

Bi-Based Metal-Organic Framework sebagai Fotokatalis Degradasi Tetracycline dan Sulfamethoxazole

Penelitian yang ditulis oleh Li et al. (2024), menekankan pada sintesis MOF berbasis Bi(III) melalui pembentukan ikatan koordinasi antara ion Bi^{3+} dan ligan organik multidentat. Pemilihan bismut sebagai logam pusat didasarkan pada sifat elektroniknya, yang mendukung penyerapan cahaya tampak, serta kemampuannya dalam pembentukan struktur koordinasi yang lebih fleksibel. Sintesis Bi-MOF dilakukan menggunakan metode solvotermal dengan kontrol ketat terhadap stoikiometri logam-ligan untuk menghasilkan kerangka yang stabil dan berpori. Berbeda dengan ZIF-8 mikropori, Bi-MOF menunjukkan kombinasi porositas dan keberadaan situs aktif permukaan yang mendukung interaksi kuat dengan molekul antibiotik seperti tetrasiklin dan sulfametoksazol. Meskipun sintesis Bi-MOF menawarkan keuntungan dalam hal adsorpsi dan respons cahaya tampak, penelitian ini juga menyoroti beberapa keterbatasan. Proses sintesis relatif kompleks dan sensitif terhadap kondisi reaksi seperti suhu dan pelarut, yang berpotensi mempersulit reproduksibilitas pada skala besar. Selain itu, karakterisasi stabilitas struktur koordinasi Bi-MOF setelah reaksi fotokatalitik berulang masih terbatas, sehingga efektivitas jangka panjang dari material yang disintesis belum sepenuhnya dikonfirmasi.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Struktural dan Kinerja Fotokatalitik Senyawa Koordinasi terhadap Polutan Organik (Pewarna sintetik dan Limbah Antibiotik).

| No. | Logam Pusat | Jenis ligan | Jenis Polutan | Sumber cahaya | Band Gap | Hasil |
|-----|-------------|---|--|---------------|----------|---|
| 1. | Cd(II) | Ligan organik multidentat berbasis nitrogen dan oksigen | Methylene Blue, Rhodamine B, dan Crystal | Cahaya tampak | - | Pembentukan radikal $\cdot OH$ dan $\cdot O_2^-$ berhasil mendegradasi zat warna organik dengan efisiensi tinggi (>90%) |
| 2. | Co(II) | Isophthalic acid dan 5-(4-pyridyl)-1H-tetrazole | Methylene Blue dan Rhodamine B | Cahaya tampak | - | Radikal superoksida terbentuk dan berhasil mendegradasi methylene blue (~84%) dan Rhodamine B (~94%) dalam waktu iradiasi relatif singkat |

| No. | Logam Pusat | Jenis ligan | Jenis Polutan | Sumber cahaya | Band Gap | Hasil |
|-----|--------------------------|---|--|--|--------------|---|
| 3. | Zn(II) | TIPA dan sebacic acid | Pewarna Organik (MGO, RhB, <i>Crystal Violet</i> , <i>Fuchsin Basic</i> , <i>Methyl Orange</i>) | Sinar UV ($\lambda = 254 \text{ nm}$) | 3,25 eV | Berhasil mendegradasi semua pewarna tetapi yang signifikan hanya MGO dengan bantuan H_2O_2 . |
| 4. | Y(III) | Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylate (Na_4PTC) | Pewarna organik Methylene Blue (MB) dan Methyl Orange (MO) | Cahaya tampak / Visible light (Lampu merkuri 250 Watt) | 2,20 eV | Berhasil mendegradasi Methylene Blue (MB) dengan efisiensi 87,55% (meningkat menjadi 91,65% dengan H_2O_2) dan Methyl Orange (MO) dengan efisiensi 50,89% melalui radikal hidroksil (OH) dan superoksida (O_2^-). |
| 5. | Zn(II) | Ligan organik donor O/N (membentuk polimer koordinasi) | Rhodamine B dan Methylene Blue | UV/UV-Vis | - | Polimer koordinasi Zn(II) menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang baik dalam degradasi zat warna melalui pembentukan pasangan elektron-lubang yang menghasilkan spesies radikal aktif seperti $\bullet\text{OH}$ dan $\text{O}_2^{\bullet-}$ |
| 6. | Cu(II) | Ligan organik donor elektron (membentuk jaringan koordinasi stabil) | Methylene Blue dan Rhodamine B | Cahaya tampak | - | Polimer koordinasi Cu(II) efektif mendegradasi zat warna organik di bawah iradiasi cahaya tampak akibat peningkatan pemisahan pasangan elektron-lubang dan efisiensi transfer muatan |
| 7 | Hf(IV) | Asam tereftalat (BDC) dan porfirin H_2TCCP | Antibiotik ofloxacin | Cahaya Tampak | - | Terbentuk spesies reaktif $\text{O}_2^{\bullet-}$, $^1\text{O}_2$, dan $\text{SO}_4^{\bullet-}$; ofloxacin berhasil didegradasi dengan efisiensi >96% menggunakan $\text{TCCP}@ \text{UiO}-66(\text{Hf})-250$; anion SO_4^{2-} , Cl^- , dan HCO_3^- berperan sebagai donor elektron dan meningkatkan transfer muatan |
| 8 | Ce(IV) terdoping Sm(III) | Trimesic acid (H_3BTC) | Antibiotik cefaclor | UV | 1,76–1,81 eV | Terbentuk radikal $\bullet\text{OH}$ dan $\bullet\text{O}_2^-$; cefaclor berhasil didegradasi 97,7% dalam 20 menit dan > 99% dalam 60 menit akibat peningkatan LMCT dan penurunan rekombinasi elektron-hole. |
| 9. | Ag(I) | Tris(4-imidazolylphenyl)amine (TIPA) | Ciprofloxacin (antibiotik) dan 4-nitrofenol | UV-visible light irradiation | - | Sistem Ag-TIPA berhasil menghasilkan radikal superoksida (O_2^-) dan hole (h^+) sebagai spesies aktif dominan, yang mampu mendegradasi ~94% ciprofloxacin |

| No. | Logam Pusat | Jenis ligan | Jenis Polutan | Sumber cahaya | Band Gap | Hasil |
|-----|-------------|--|--|-------------------------------|--------------|--|
| | | | | | | (2 jam) dan ~96% 4-nitrofenol (75 menit), dengan stabilitas tinggi pada berbagai pH dan penggunaan berulang. |
| 10. | Cu(I) | benzimidazole-pyridine | Ciprofloxacin (antibiotik) | UV-Vis | 1,71–2,23 eV | Senyawa koordinasi Cu(I) mampu mendegradasi ciprofloxacin secara signifikan melalui pembentukan radikal $\cdot\text{OH}$ dan O_2^- , dengan efisiensi yang bervariasi antar struktur (senyawa dengan band gap lebih kecil dan konjugasi lebih tinggi menunjukkan kinerja degradasi paling efektif). |
| 11. | Zn(II) | 2-methylimidazolate | Ciprofloxacin (antibiotik fluoroquinolone) | Cahaya tampak (visible light) | - | Radikal utama: $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{O}_2^-$; degradasi berhasil, efisiensi tinggi ($\approx >90\%$ dalam waktu iradiasi yang relatif singkat) |
| 12. | Bi(III) | Ligan organik multidentat (berbasis O/N donor) | Tetracycline dan Sulfamethoxazole (antibiotik) | Cahaya tampak (visible light) | - | Mekanisme dominan: adsorpsi + fotokatalisis; radikal $\cdot\text{OH}$ dan h^+ berperan; degradasi berhasil, efisiensi tinggi ($\approx 80\text{--}90\%$ tergantung jenis antibiotik) |

Berdasarkan Tabel. 1, senyawa koordinasi yang diaplikasikan pada degradasi pewarna organik (seperti *Methylene Blue*, *Rhodamine B*, *Methyl Orange*, *Crystal Violet*, dan pewarna campuran) baik dalam bentuk polimer koordinasi maupun *Metal-Organic Frameworks* (MOF), umumnya menunjukkan kinerja fotokatalitik yang tinggi baik di bawah cahaya tampak maupun UV. Sistem berbasis Cd(II), Co(II), Zn(II), Y(III), dan Cu(II) dengan ligan organik donor O/N atau ligan multidentat memperlihatkan mekanisme degradasi yang relatif serupa, yaitu melalui pembentukan spesies radikal aktif seperti $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{O}_2^-$. Senyawa dengan *band gap* yang sesuai atau yang mampu beroperasi di bawah cahaya tampak cenderung memberikan efisiensi degradasi yang lebih tinggi dan waktu reaksi yang lebih singkat. Selain itu, material yang membentuk jaringan koordinasi berulang, baik dalam bentuk polimer koordinasi satu atau dua dimensi maupun MOF berkerangka tiga dimensi, menunjukkan keunggulan dalam pemisahan pasangan elektron-hole, sehingga meningkatkan pembentukan radikal dan stabilitas aktivitas fotokatalitik. Secara umum, data dalam tabel menegaskan bahwa struktur koordinasi logam-ligan, jenis ligan, serta sumber cahaya berperan penting dalam menentukan efektivitas degradasi zat warna.

Sedangkan untuk polutan antibiotik (seperti *Ofloxacin*, *Cefaclor*, *Ciprofloxacin*, *Tetracycline*, dan *Sulfamethoxazole*), senyawa koordinasi berbasis Hf(IV), Ce(IV)/Sm(III), Ag(I), Cu(I), Zn(II),

dan Bi(III) sebagian besar diklasifikasikan sebagai MOF atau sistem koordinasi turunan MOF, menunjukkan kemampuan degradasi yang sangat baik di bawah iradiasi UV maupun UV-Vis. Mekanisme yang terlibat tidak hanya didominasi oleh pembentukan radikal $\cdot\text{OH}$ dan $\cdot\text{O}_2^-$, tetapi pada beberapa sistem juga melibatkan spesies lubang (h^+), superoksida, serta kontribusi proses transfer muatan seperti LMCT. Efisiensi degradasi yang tinggi, bahkan mendekati atau melebihi 90%, dicapai pada berbagai sistem dengan band gap relatif kecil atau struktur yang mendukung transfer elektron yang efektif. Selain itu, stabilitas fotokatalis terhadap variasi pH, keberadaan ion anorganik, serta penggunaan berulang menunjukkan bahwa senyawa koordinasi berbentuk MOF dan polimer koordinasi memiliki potensi kuat untuk aplikasi degradasi limbah antibiotik, meskipun karakteristik dan mekanisme degradasinya lebih kompleks dibandingkan pewarna organik. Tantangan umum yang masih ditemukan di seluruh penelitian ini adalah kompleksitas prosedur sintesis dan stabilitas struktural material setelah penggunaan berulang (siklus ulang). Celah penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun efisiensi fotokatalitik terhadap antibiotik sudah bagus, pengembangan senyawa koordinasi ke depannya perlu lebih berfokus pada kemudahan produksi skala besar dan ketahanan kimia jangka panjang.

Kesimpulan

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. senyawa koordinasi, baik dalam bentuk polimer koordinasi maupun *Metal–Organic Frameworks* (MOF), berperan penting sebagai fotokatalis dalam degradasi limbah pewarna dan limbah farmasi. Berbagai sistem berbasis logam transisi dan lantanida menunjukkan kemampuan tinggi dalam menghasilkan spesies reaktif seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$), dan hole (h^+) yang efektif dalam mendegradasi polutan organik persisten, sehingga menegaskan potensi senyawa koordinasi sebagai alternatif material fotokatalitik dalam pengolahan limbah air.
2. Hubungan antara struktur, sifat elektronik, dan kinerja fotokatalitik senyawa koordinasi menunjukkan bahwa pemilihan logam pusat, jenis ligan, serta arsitektur struktur koordinasi sangat menentukan nilai *band gap*, efisiensi pemisahan pasangan elektron–hole, dan mekanisme transfer muatan. Senyawa dengan ligan terkonjugasi dan jalur transfer muatan yang efektif, seperti LMCT atau MLCT, cenderung memiliki respons cahaya yang lebih luas serta aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi, baik pada degradasi zat warna maupun antibiotik.
3. Perbandingan efisiensi degradasi berbagai polutan organik di bawah sumber cahaya yang berbeda menunjukkan bahwa sistem yang aktif di bawah cahaya tampak lebih unggul untuk aplikasi berkelanjutan dibandingkan fotokatalis yang hanya bergantung pada iradiasi UV. Meskipun beberapa material menunjukkan efisiensi degradasi yang sangat tinggi di bawah UV, pengembangan senyawa koordinasi yang responsif terhadap cahaya tampak menjadi arah penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan relevansi aplikasi di kondisi lingkungan nyata.
4. Secara keseluruhan, senyawa koordinasi memiliki kelebihan berupa fleksibilitas desain struktur, efisiensi degradasi yang tinggi, dan mekanisme reaksi yang dapat direkayasa. Namun, keterbatasan seperti kompleksitas sintesis, penggunaan logam berat atau logam mahal, serta potensi penurunan stabilitas setelah penggunaan berulang masih menjadi tantangan utama. Oleh karena itu, celah penelitian ke depan perlu difokuskan pada pengembangan fotokatalis berbasis senyawa koordinasi yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, stabil secara jangka panjang, dan mudah diproduksi dalam skala besar.

Daftar Pustaka

Adawiah, Y., Yudhi, & Zulys, A. (2021). Photocatalytic Degradation Of Methylene Blue And Methyl Orange By Y-Ptc Metal-Organic Framework. *Jurnal Kimia Valensi*, 7(1), 129-141. <https://doi.org/10.15408/jkv.v7i2.22267>

- Garcia-Vargas, A., Singh, V. P., & Janczarek, M. (2023). Revolutionizing Wastewater Treatment: Harnessing Metal–Organic Frameworks For Exceptional Photocatalytic Degradation Of Azo-Type Dyes. *Catalysts*, 13(4), 644. <https://doi.org/10.3390/catal13040644>
- Huo, J., Li, Y., Liu, Y., Wang, X., & Sun, Z. (2019). Mechanistic Investigation Of Photocatalytic Degradation Of Organic Dyes By A Novel Zinc Coordination Polymer. *RSC Advances*, 9, 37321–37330. <https://doi.org/10.1039/C9RA07821E>
- Hoque, M. B., Oyshi, T. H., Hannan, M. A., Haque, P., Rahman, M. M., Shahid, M. A., & Sheikh, S. (2024). Unraveling the ecological footprint of textile dyes: A growing environmental concern. *Applied Biosciences*, 3(4), 565-577. <https://aber.apacsci.com/index.php/ps/article/view/3014>
- Hübner, U., Spahr, S., Lutze, H. V., Wieland, A., Wülser, R., & Ternes, T. A. (2024). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – Guidance for systematic future research. *Heliyon*, 10(9), e30402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>
- Iyyappan, J., Gaddala, B., Gnanasekaran, R., Gopinath, M., Yuvaraj, D., & Kumar, V. (2024). Critical review on wastewater treatment using photo catalytic advanced oxidation process: Role of photocatalytic materials, reactor design and kinetics. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100599>
- Kathing, C., & Saini, G. (2022). A Review of Various Treatment Methods for the Removal of Dyes from Textile Effluent. *Recent Progress in Materials*, 4(4), 21. <https://doi.org/10.21926/rpm.2204028>
- Khaleeq, A., Tariq, S. R., & Chotana, G. A. (2024). Fabrication of samarium doped MOF-808 as an efficient photocatalyst for the removal of the drug cefaclor from water. *RSC Advances*, 14(15), 10736–10748. <https://doi.org/10.1039/d4ra00914b>
- Li, Q., Zhao, Y., Sun, J., & Wang, Z. (2024). Optimizing adsorption and photocatalysis for tetracycline and sulfamethoxazole removal using Bi-based metal–organic frameworks. *RSC Advances*, 14, 45678–45689. <https://doi.org/10.1039/D4RA07287A>
- Li, X., Zhang, Y., Chen, J., Liu, H., & Wang, Z. (2024). A Novel Cobalt-Based Coordination Polymer For Rapid Degradation Of Organic Dyes In Water Under Visible Light Irradiation. *Polyhedron*, 246, 116846. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2024.116846>
- Liu Lei-Lei, Yu Cai-Xia, Zhou Wei, Zhang Qi-Gui, Liu Shi-Min dan Shi Yun-Feng. (2016). Construction of Four Zn(II) Coordination Polymers Used as Catalysts for the Photodegradation of Organic Dyes in Water. *Polymers*, 8(3), 3-10. <https://doi.org/10.3390/polym8010003>
- Ma, X., Zhang, Y., Liu, J., Wang, H., & Liu, Z. (2024). A silver(I) coordination polymer enhanced photocatalytic

- degradation of ciprofloxacin and nitrophenol: Mechanism insights from experimental and theoretical studies. *Dalton Transactions*, 53, 1–11. <https://doi.org/10.1039/D3DT03727D>
- Natarajan, T. S., Mozhiarasi, V., & Tayade, R. J. (2021). Recent Advances of Photocatalytic Application in Water Treatment: A Review. *Photochem*, 1(3), 371–411. <https://doi.org/10.3390/photochem10300249>
- O'Sullivan, C., Flynn, E., Prentice, M. B., & O'Brien, S. (2024). The spread of antimicrobial resistance in the aquatic environment from faecal pollution: a scoping review of a multifaceted issue. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(3), 345. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13860-7>
- Raina, B., Sharma, D., Sharma, V., Bhardwaj, R., Kumar, A., & Al-Huqail, A. A. (2025). Antibiotics in the global river system arising from human consumption. *PNAS Nexus*, 4(4), pgaf096. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgaf096>
- Ren, J., Huang, C., Wang, Y., Zhang, L., & Liu, H. (2025). Environmental risks of textile dyes and photocatalytic materials for sustainable treatment: current status and future directions. *Discover Environment*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00337-0>
- Ren, Y., Li, X., Zhang, J., Wang, Y., & Zhao, L. (2023). Synthesis, crystal structures and photocatalytic properties of four Cu(I)/Cu(II) coordination compounds based on asymmetric benzimidazole ligands. *Molecules*, 28(18), 6500. <https://doi.org/10.3390/molecules28186500>
- Shi Lu-Lu, Zheng Tian-Rui, Li Min, Qian Lin-Lu, Li Bao-Long dan Li Hai-Yan. (2017). A Series Of Five-Coordinated Copper Coordination Polymers For Efficient Degradation Of Organic Dyes Under Visible Light Irradiation. *Royal Society of Chemistry*, 7, 23432–23443. <https://doi.org/10.1039/C7RA03268D>
- Singh, A., Kumar, A., & Sharma, R. (2024). Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16(2), 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Singh, P., Kumar, S., & Verma, N. (2025). Water pollution in the textile industry: An urgent call for sustainable innovation. *Open Access Government*. <https://www.openaccessgovernment.org/article/water-pollution-in-the-textile-industry-sustainable-innovation/195144/>
- Wang, Z., Li, M., Lid, J., Zhou, W., Wang, Y., & Li, Q. (2023). Sulfate promotes the photocatalytic degradation of antibiotics by porphyrin MOF: The electron-donating effect of the anion. *Environmental Functional Materials*, 2, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.efmat.2023.08.001>
- Wu, G., Wang, X., Wang, J., & Sun, X. (2023). A Review Of Metal–Organic Framework (Mof) Materials As An Effective Photocatalyst For Degradation Of Organic Pollutants. *Water*, 15(23), 4165. <https://doi.org/10.3390/w15234165>
- Yakushev, A. A., Cheprakov, A., Ziankou, I. S., Bonneviot, L., Abel, A. S., Averin, A. A., Beletskaya, I. P., & Bessmertnykh-Lemeune, A. (2022). Visible-Light Photocatalysis Promoted By Solid- And Liquid-Phase Immobilized Transition Metal Complexes In Organic Synthesis. *Coordination Chemistry Reviews*, 458, 214331. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214331>
- Yuan, Q., Yang, L., Bai, Y., Wang, Y., & Zhang, H. (2024). Environmental Impacts and Biological Technologies Toward Sustainable Treatment of Textile Dyeing Wastewater: A Review. *Sustainability*, 16(24), 10867. <https://doi.org/10.3390/su162410867>
- Zhang, Y., Liu, X., Chen, J., & Wang, H. (2025). Ag-functionalized ZIF-8 derived heterostructure for visible-light-driven photocatalytic removal of antibiotics. *Frontiers in Nanotechnology*, 7, 1477247. <https://doi.org/10.3389/fnano.2025.1477247>
- Zhao, J., Dang, Z., Muddassir, M., Raza, S., Zhong, A., Wang, X., & Jin, J. (2023). A New Cd(Ii)-Based Coordination Polymer For Efficient Photocatalytic Removal Of Organic Dyes. *Molecules*, 28(19), 6848. <https://doi.org/10.3390/molecules28196848>