



REVIEW: DEGRADASI SENYAWA AZO MENGGUNAKAN FOTOKATALIS BERBASIS SENG OKSIDA DAN POTENSINYA DALAM PENGOLAHAN LIMBAH TEKSTIL

Lutfi Mohamad Rohman, Alex Lukmanto*

*email : alexlukmanto@iwu.ac.id

Departemen Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi

International Women University

Jl. Pasir Kaliki No.179, Pamoyanan, Kec. Cicendo, Kota Bandung, Jawa Barat 40173

(Diterima: Oktober 2024; Direvisi: November 2024; Dipublikasikan: Desember 2024)

ABSTRAK

Senyawa azo, terutama metil jingga, merupakan salah satu zat pewarna sintesis yang umum digunakan di industri tekstil namun sulit terurai dan bersifat toksik. Artikel ini mengulas efektivitas kompleks seng nitroprusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$ sebagai fotokatalis dalam mendegradasi metil jingga di bawah sinar matahari. Kompleks disintesis menggunakan metode presipitasi tetes dan dikarakterisasi melalui SEM, XRD, FTIR, Raman, serta UV-Vis. Hasil menunjukkan bahwa kompleks memiliki morfologi partikel yang baik, struktur kristal ortorombik, dan celah pita sempit ($\sim 1,51$ eV) yang cocok untuk fotokatalisis cahaya tampak. Studi fotodegradasi menunjukkan bahwa efisiensi degradasi optimal dicapai pada dosis katalis tertentu, pH rendah, dan dengan penambahan H_2O_2 . Temuan ini mengindikasikan bahwa kompleks $Zn[Fe(CN)_5NO]$ berpotensi sebagai fotokatalis ramah lingkungan untuk pengolahan limbah tekstil.

Kata Kunci: metil jingga, senyawa azo, seng nitroprusida, fotokatalis, pengolahan limbah tekstil

ABSTRACT:

Azo compounds, particularly methyl orange, are widely used synthetic dyes in the textile industry but are difficult to degrade and toxic. This article reviews the effectiveness of zinc nitroprusside complex $Zn[Fe(CN)_5NO]$ as a photocatalyst for degrading methyl orange under sunlight. The complex was synthesized via a dropwise precipitation method and characterized using SEM, XRD, FTIR, Raman, and UV-Vis spectroscopy. Results indicate good particle morphology, orthorhombic crystal structure, and a narrow band gap (~ 1.51 eV), ideal for visible-light photocatalysis. Photodegradation studies revealed optimal degradation efficiency at specific catalyst doses, low pH, and with H_2O_2 addition. These findings suggest that $Zn[Fe(CN)_5NO]$ complex is a promising eco-friendly photocatalyst for textile wastewater treatment.

Keywords: methyl orange, azo compound, zinc nitroprusside, photocatalyst, textile wastewater treatment

PENDAHULUAN

Senyawa azo adalah kelompok zat warna sintesis yang paling banyak digunakan di berbagai industri, terutama tekstil, makanan, dan kosmetik. Keunggulan senyawa ini terletak pada stabilitas warna dan variasi warna yang dihasilkan. Namun, penggunaannya yang masif juga menimbulkan permasalahan lingkungan yang serius, terutama dalam limbah cair industri (Alzain *et al.*, 2023). Senyawa azo cenderung sulit terurai secara alami karena ikatan azo yang kuat, sehingga tetap bertahan di lingkungan dan dapat mencemari sumber air. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa senyawa azo memiliki sifat toksik, mutagenik, bahkan karsinogenik jika tidak didegradasi dengan baik (Jiang *et al.*, 2020). Akumulasi senyawa ini di lingkungan perairan tidak hanya merusak ekosistem tetapi juga berisiko bagi kesehatan manusia. Oleh karena itu, dibutuhkan metode pengolahan limbah yang tidak hanya efisien tetapi juga ramah lingkungan untuk mengurangi dampak negatif dari senyawa azo (Alzain *Et al.*, 2023). Sekian banyak jenis senyawa azo, terdapat empat yang umum digunakan dalam industri, yaitu *Acid Orange*, *Acid*

Red, Direct Red, dan Direct Black. Dalam penelitian ini, fokus kajian diarahkan secara khusus pada *Acid Orange*, mengingat penggunaannya yang luas serta potensi toksisitasnya terhadap organisme akuatik dan dampak terhadap lingkungan (Alzain *et al.*, 2023).

Salah satu contoh senyawa dalam kelompok *Acid Orange* yang banyak digunakan adalah metil jingga. Metil jingga dipilih dalam penelitian ini karena merupakan jenis pewarna azo larut air yang biasa digunakan dalam media asam untuk mewarnai serat seperti wol dan nilon (Abd El-Aziz *et al.*, 2024). Pewarna ini dikenal bersifat toksik, mutagenik, serta sulit terurai secara alami. Dalam studi pengolahan air, metil jingga sering dijadikan model polutan organik karena sifatnya yang stabil, larut dalam air, dan mudah dianalisis menggunakan spektrofotometri pada panjang gelombang 463 nm. Selain itu, struktur kimianya yang mengandung gugus azo membuatnya cukup reaktif terhadap proses fotokatalitik. Oleh karena itu, metil jingga sangat cocok untuk digunakan dalam mengevaluasi efektivitas fotokatalis $Zn[Fe(CN)_5NO]$ dalam mendegradasi senyawa pencemar di lingkungan perairan (Djebli *et al.*, 2020). Untuk menanggulangi permasalahan pencemaran ini, metode fotokatalisis dapat dimanfaatkan sebagai teknologi yang efisien dan ramah lingkungan.

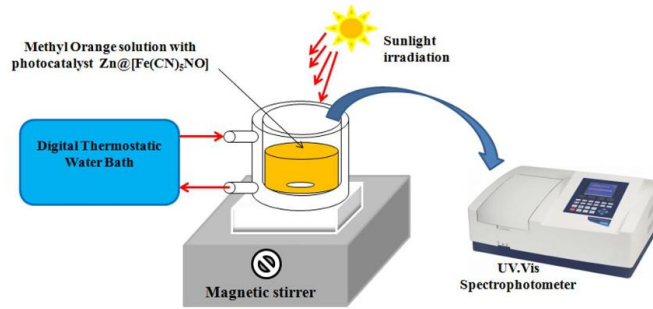
Fotokatalisis merupakan proses pemanfaatan cahaya (biasanya ultraviolet) untuk mengaktifkan semikonduktor yang akan menghasilkan radikal bebas, seperti OH^\cdot , yang sangat reaktif dalam memecah senyawa organik kompleks menjadi produk yang lebih sederhana dan tidak berbahaya. Proses ini menarik karena tidak memerlukan bahan kimia tambahan yang berbahaya dan dapat dijalankan pada kondisi lingkungan (Abdelrahman *et al.*, 2020a). Dari berbagai material semikonduktor yang telah dikaji, Zinc Oxide (ZnO) menjadi salah satu kandidat yang paling banyak digunakan karena memiliki energi celah pita yang sesuai untuk reaksi fotokatalitik, mudah disintesis, bersifat tidak beracun, dan tersedia dalam jumlah besar dengan harga yang terjangkau. Namun, performa ZnO sangat dipengaruhi oleh metode sintesis yang digunakan, terutama jika dikombinasikan dengan kompleks seng nitroprusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$. Kompleks ini dapat memodifikasi karakteristik morfologi dan struktur kristal ZnO, yang berdampak langsung terhadap efektivitas degradasi senyawa azo. (Djebli *et al.*, 2020) Dengan demikian, penting untuk memahami bagaimana metode sintesis memengaruhi kinerja fotokatalis kompleks seng nitroprusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$ dalam proses degradasi senyawa azo, khususnya metil jingga (methyl orange) (Jiang *et al.*, 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mengulas berbagai pendekatan sintesis material tersebut serta pengaruhnya terhadap efisiensi fotokatalitik, sehingga dapat memberikan gambaran strategis dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang berkelanjutan.

Metode

Kompleks seng nitroprusida ($Zn [Fe(CN)_5NO]$) disintesis menggunakan metode presipitasi kimia tetes. Hingga 25 mL larutan nitroprusida (0,19 mol/L) perlahan-lahan jatuh ke maksimum 25 mL larutan seng klorida (0,19 mol/L) dengan pengadukan berat pada suhu kamar. Ketika larutan menjadi turbulen, kompleks yang terbentuk dicuci dengan air suling dan dikeringkan dalam vakum pada suhu kamar. Semua bahan kimia yang digunakan adalah reagen tingkat kemurnian analitik.

Karakterisasi kompleks sintesis dilakukan dengan menggunakan beberapa teknik analitik. Struktur kristal ditentukan oleh XRD (XRD) menggunakan Bruker D8 difractometer (Bruker-D8), sedangkan morfologi permukaan diamati dengan tipe mikroskop elektron (SEM) FEI Quanta 200. Spektrum getaran koneksi dikarakterisasi menggunakan spektroskopi Raman (RM2000) dan spektroskopi FTIR inframerah (Perkin-Elmer untuk 100). Sifat optik ditentukan oleh UV-Vis Shimad oleh UV-Vis Shimad dan data reflektif digunakan untuk menghitung energi pita perikat menggunakan metode TAUC.

Foto Substitusi Kompleks Nitroprusida Zinc dievaluasi dengan proses penambangan metil oranye (MO) di bawah radiasi sinar matahari. Tes ini dilakukan dalam reaktor ganda yang dilengkapi dengan rendaman air termostat dan konsentrasi MO sebelum dan sesudah reaksi diukur menggunakan spektrofotometer UV-VIS dengan panjang gelombang 63 nm. Efisiensi penambangan dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi dan efek dari beberapa parameter seperti dosis katalis, konsentrasi hidrogen peroksida, nilai pH larutan, dan konsentrasi awal MO.

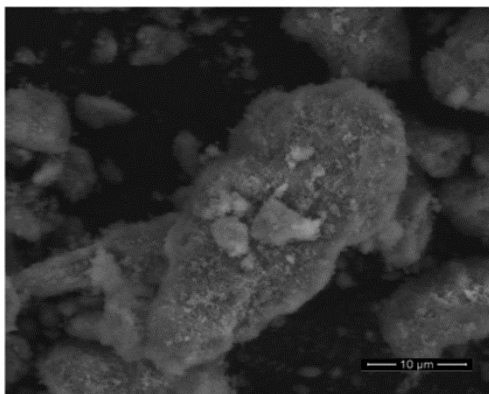


Gambar 1. Skema dan fotoreaktor yang digunakan

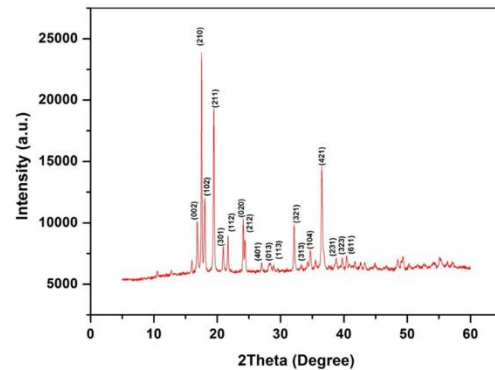
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi seng nitropusida

Gambar 2 memperlihatkan citra SEM yang merepresentasikan morfologi permukaan kompleks seng nitropusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$. Dari gambar tersebut tampak bahwa tingkat agregasi partikel cukup rendah, menunjukkan bahwa partikel tersebar dengan baik. Kompleks yang disintesis memperlihatkan struktur mikro yang bersifat heterogen, dengan ukuran butir bervariasi antara 3 hingga 30 mikrometer. Teramati pula bahwa partikel membentuk matriks yang cukup seragam. Selanjutnya, Gambar 3 menunjukkan pola difraksi sinar-X (XRD) dari kompleks tersebut. Pola difraksi menampilkan sejumlah puncak karakteristik pada sudut 2θ , antara lain $16,85^\circ$, $17,47^\circ$, $18,02^\circ$, $19,42^\circ$, hingga $41,66^\circ$, yang diindeks terhadap bidang kristal seperti (002), (210), (102), dan lainnya. Hasil ini mengindikasikan bahwa kompleks $Zn[Fe(CN)_5NO]$ memiliki struktur kristal ortorombik dengan grup ruang $Pnma$, sesuai dengan data JCPDS No. 00-052-0340.

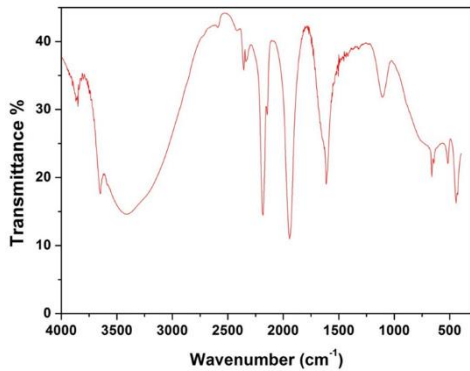


Gambar 2. Gambar SEM dari seng nitropusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$

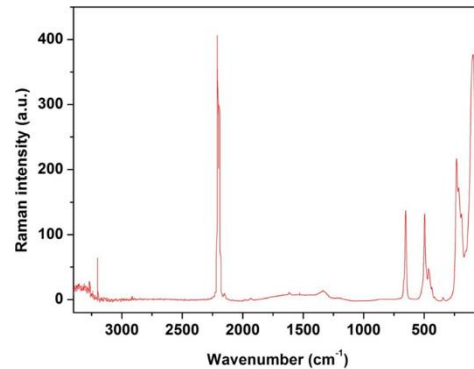


Gambar 3. Pola XRD kompleks seng nitropusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$

Aspek yang paling penting berkaitan dengan spektrum FTIR dari kompleks cyano yang terhubung ke pita beresilasi area ($\nu-CN$) ($2200-1900\text{cm}^{-1}$). ($3660-3580$), 2193 , 1952 , 1653 , 658 dan 7 cm^{-1} getaran pita ($\nu-oh$), getaran $cwerb$, $n = o$, $h-h$, $fe-no-cn$, order kolom kolom. Puncak ini ditargetkan untuk kelompok fungsional koordinasi yang tepat dengan literatur yang dilaporkan. Spektrum Raman dari sistem cyanocomplex ditunjukkan pada Gambar 5. Untuk pendidikan yang kompleks, pita kecil 1605cm^{-1} ditandai sebagai di tengah pita dalam spektrum ligan terbuka. Puncak intensif 2215cm^{-1} terhubung ke stretch pita grup CN. Rekaman ini dipisahkan dari CN dan kelompok-kelompok tidak terlihat di daerah ini [$100-700$] CM^{-1} . Tiga puncak, 238 , 91 , dan 655cm^{-1} , ditugaskan ke pita Fe-C-N-Fe



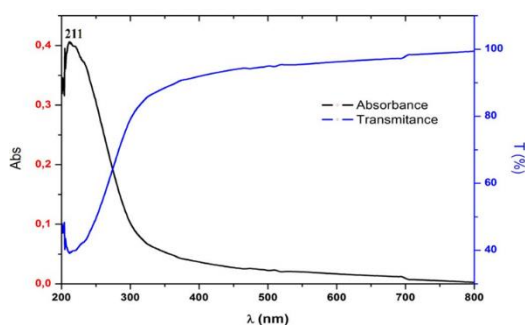
Gambar 4. Spektrum FTIR kompleks seng nitroprusida sintesis $Zn[Fe(CN)_5NO]$



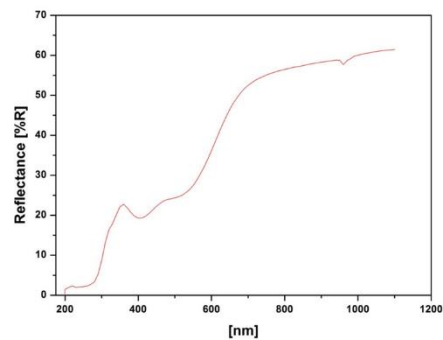
Gambar 5. Pola raman kompleks seng nitroprusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$

Spektrum FTIR kompleks seng nitroprusida menunjukkan pita vibrasi pada rentang $2200\text{--}1900\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan getaran gugus siano ($\text{--C}\equiv\text{N}$). Selain itu, pita-pita lain terdeteksi pada $3660\text{--}3580\text{ cm}^{-1}$, 2193 cm^{-1} , 1952 cm^{-1} , 1653 cm^{-1} , 658 cm^{-1} , dan 447 cm^{-1} . Pita-pita tersebut mengindikasikan keberadaan berbagai gugus fungsi seperti --OH , $\text{C}\equiv\text{N}$, $\text{N}=\text{O}$, molekul air (H_2O), Fe--NO , dan Fe--CN , yang menunjukkan koordinasi yang baik antar ligan dalam struktur kompleks. Keberadaan pita-pita ini memperkuat bukti identifikasi gugus fungsi penyusun dan mengonfirmasi keberhasilan sintesis struktur kimia kompleks yang diharapkan.

Spektrum Raman juga mendukung hasil tersebut dengan menampilkan pita-pita vibrasi molekul yang khas. Puncak kecil di sekitar 1605 cm^{-1} diasosiasikan dengan pita amida dari ligan bebas yang masih tersisa dalam struktur, sementara puncak intens di 2215 cm^{-1} merupakan pita peregangan gugus sianida (CN), menandakan keberadaan grup nitril yang berperan penting dalam kerangka kompleks. Pita-pita ini mengonfirmasi bahwa gugus CN berkontribusi terhadap karakter vibrasional molekul dan mendukung kestabilan serta reaktivitas kompleks.



Gambar 6. Spektra serapan UV-Vis dan transmitansi dari sintesis kompleks seng nitroprusida ($Zn[Fe(CN)_5NO]$)

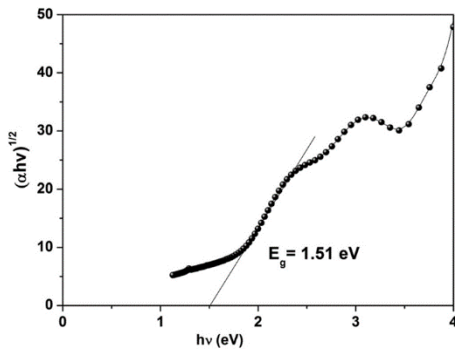


Gambar 7. Spektrum reflektansi dari kompleks seng nitroprusida ($Zn[Fe(CN)_5NO]$)

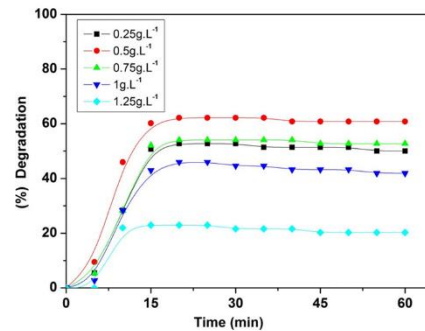
Spektrum serapan UV-Vis dan transmitansi dari kompleks seng nitroprusida ($Zn[Fe(CN)_5NO]$) menunjukkan karakteristik optik yang khas dan relevan untuk aplikasi fotokatalitik. Spektrum UV-Vis menampilkan pita serapan kuat pada daerah ultraviolet ($200\text{--}300\text{ nm}$), yang mengindikasikan terjadinya transisi elektronik dari orbital terisi ke orbital tak terisi, seperti transisi $n\rightarrow n^*$ dan $n\rightarrow\pi^*$. Transisi ini berkaitan erat dengan keberadaan gugus nitrosil (--NO) dan sianida (--CN) dalam struktur kompleks, yang dikenal memiliki aktivitas elektronik tinggi (Djebli *et al.*, 2020). Kehadiran pita-pita serapan ini mengonfirmasi bahwa kompleks memiliki potensi untuk menyerap cahaya tampak secara efektif, ditunjukkan oleh energi celah pita (band gap) yang kecil, yaitu sekitar $1,51\text{ eV}$.

Spektrum reflektansi kompleks ini memberikan data pelengkap untuk menganalisis sifat optik lebih lanjut. Dengan menggunakan metode ekstrapolasi terhadap kurva reflektansi, diperoleh nilai energi celah pita optik yang sejalan dengan hasil dari spektrum UV-Vis, yaitu sekitar 1,51 eV. Nilai ini mengindikasikan bahwa kompleks seng nitroprussida mampu berfungsi secara efisien sebagai fotokatalis di bawah penyinaran cahaya tampak (Abdelrahman *et al.*, 2020b). Spektrum reflektansi ini juga berperan penting dalam memahami mekanisme transisi elektron dalam material, yang menjadi dasar untuk merancang aplikasi lanjutan berbasis energi surya atau degradasi senyawa organik melalui proses fotokatalitik.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi spektrum UV-Vis, transmitansi, dan reflektansi menunjukkan bahwa kompleks $Zn[Fe(CN)_5NO]$ memiliki sifat optik yang sangat mendukung untuk diaplikasikan sebagai bahan fotokatalis aktif. Energi celah pita yang rendah memungkinkan interaksi yang efisien dengan spektrum cahaya tampak, menjadikan material ini kandidat potensial untuk berbagai aplikasi lingkungan dan energi berbasis teknologi fotokatalisis.



Gambar 8. Plot $(\alpha h\nu)^{1/2}$ versus energi foton dari kompleks seng nitroprussida ($Zn[Fe(CN)_5NO]$)



Gambar 9. Pengaruh dosis katalis terhadap degradasi foto MO di bawah sinar matahari

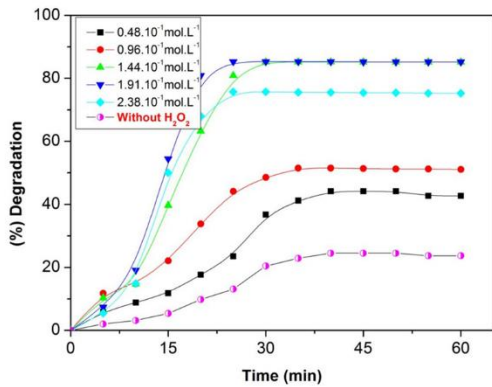
Gambar 8 menampilkan grafik plot $(\alpha h\nu)^{1/2}$ terhadap energi foton $h\nu$ (eV) yang diperoleh dari data spektrum reflektansi UV-Vis kompleks seng nitroprussida ($Zn[Fe(CN)_5NO]$). Grafik ini digunakan untuk menentukan nilai energi celah pita optik (E_g) dengan metode Tauc plot. Ekstrapolasi garis linier pada bagian tegak kurva ke titik di mana $(\alpha h\nu)^{1/2} = 0$ memberikan nilai E_g sebesar $\pm 1,51$ eV. Nilai ini menunjukkan bahwa kompleks tersebut memiliki celah pita yang sempit dan mampu menyerap cahaya tampak secara efisien. Ketersediaan energi rendah untuk eksitasi elektron ini menjadi indikator penting bagi performa fotokatalitik yang baik, khususnya dalam aplikasi degradasi senyawa organik di bawah pencahayaan spektrum tampak.

Gambar 9 mengilustrasikan pengaruh variasi dosis katalis terhadap efisiensi degradasi zat warna metil oranye (MO) di bawah penyinaran sinar matahari. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan dosis katalis hingga 0,5 g/L menyebabkan peningkatan efisiensi degradasi, yang mencapai sekitar 64% dalam waktu 20 menit. Namun, ketika dosis katalis melebihi 0,5 g/L, efisiensi degradasi justru mengalami penurunan. Fenomena ini diduga disebabkan oleh terjadinya aglomerasi partikel pada konsentrasi tinggi, yang mengurangi luas permukaan aktif dan membatasi akses sinar matahari ke situs aktif katalis, sehingga menurunkan efektivitas fotodegradasi.

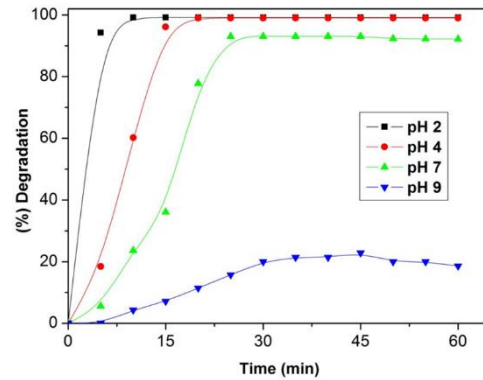
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kompleks seng nitroprussida tidak hanya memiliki karakteristik optik yang mendukung, tetapi juga menunjukkan kinerja katalitik yang optimal pada dosis tertentu. Kombinasi dari celah pita sempit dan efisiensi degradasi yang tinggi di bawah sinar matahari memperkuat potensi material ini sebagai fotokatalis yang efektif dan ramah lingkungan dalam aplikasi pengolahan limbah cair, khususnya dalam degradasi pewarna organik berbahaya.

Studi Aktivasi fotokatalitik

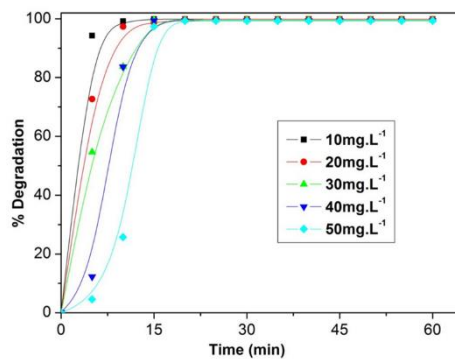
Gambar 10 menyajikan efek penambahan H₂O₂ terhadap kemampuan fotokatalitik kompleks seng nitroprussida dalam mendegradasi zat warna metil oranye (MO). Tanpa H₂O₂, tingkat degradasi hanya mencapai sekitar 23%, menandakan bahwa pembentukan radikal hidroksil (•OH) yang sangat berperan dalam proses oksidasi berlangsung secara terbatas. Ketika H₂O₂ ditambahkan sebanyak $1,91 \times 10^{-3}$ mol/L, efisiensi degradasi meningkat signifikan hingga mencapai sekitar 80%. Ini menunjukkan bahwa H₂O₂ berfungsi sebagai agen penting dalam menghasilkan radikal aktif, sehingga mempercepat reaksi fotodegradasi terhadap senyawa organik (Byrd & Hood, 2022).



Gambar 10. Efisiensi degradasi foto MO dengan dan tanpa H₂O₂



Gambar 9. Pengaruh pH larutan pada penghilangan pewarna MO



Gambar 12. Pengaruh konsentrasi zat warna (MO) terhadap efisiensi degradasi

Gambar 11 menunjukkan bahwa tingkat keasaman larutan memiliki pengaruh besar terhadap efektivitas penghilangan MO. Kondisi paling optimal tercapai pada pH rendah, terutama pada pH 2 dan 4, yang memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat, yakni dalam rentang waktu 10 hingga 15 menit. Pada tingkat keasaman tersebut, muatan positif permukaan katalis meningkat dan memfasilitasi interaksi dengan molekul MO bermuatan negatif. Sebaliknya, pada pH netral hingga basa, efisiensi degradasi mengalami penurunan karena terbatasnya situs aktif serta kemungkinan reaksi samping yang kurang mendukung proses fotokatalitik.

Gambar 12 menggambarkan dampak konsentrasi awal MO terhadap efisiensi fotodegradasi. Pada konsentrasi rendah (10 mg/L), degradasi berlangsung hampir sempurna dalam waktu singkat (sekitar 10 menit). Namun, peningkatan konsentrasi hingga 50 mg/L menyebabkan penurunan efisiensi secara bertahap. Hal ini diakibatkan oleh persaingan antar molekul MO dalam memanfaatkan situs aktif katalis, serta meningkatnya kekeruhan larutan yang menghambat penetrasi cahaya, sehingga menurunkan performa fotokatalitik secara keseluruhan.

SIMPULAN

Berdasarkan studi literatur dan hasil eksperimen, dapat disimpulkan bahwa kompleks seng nitroprusida $Zn[Fe(CN)_5NO]$ menunjukkan potensi tinggi sebagai fotokatalis untuk degradasi metil jingga, yang mewakili senyawa *azo* berbahaya dalam limbah tekstil. Karakterisasi menunjukkan struktur kristal dan sifat optik yang mendukung aktivitas fotokatalitik di bawah sinar matahari. Efisiensi degradasi paling tinggi dicapai dengan dosis katalis optimal, penambahan H_2O_2 , dan kondisi pH asam. Dengan energi celah pita yang sempit ($\sim 1,51$ eV), kompleks ini mampu beroperasi efektif di bawah cahaya tampak tanpa perlu sumber UV buatan. Hal ini menjadikannya sebagai solusi yang menjanjikan dan ramah lingkungan dalam teknologi pengolahan limbah cair industri tekstil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih yang mendalam ditujukan pengembang Jurnal Chemistry IWU (J-ChemWu) yang telah menyediakan wadah ilmiah yang sangat bermanfaat bagi pengembangan pengetahuan dan publikasi hasil kajian ilmiah di bidang kimia.

Penulis juga memberikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada dosen pengampu mata kuliah metodologi penelitian, yang telah memberikan bimbingan akademik, arahan metodologis, serta masukan konstruktif sepanjang proses penulisan artikel ini berlangsung. Dukungan dari pihak akademisi sangat penting dalam menjaga kualitas kajian dan ketepatan pendekatan ilmiah yang digunakan.

Ucapan terima kasih khusus juga penulis tujukan kepada Abdelkrim Djebli dan tim penelitiannya atas karya ilmiah mereka yang menjadi rujukan utama dalam artikel ini. Penelitian mereka yang berjudul *Photocatalytic degradation of methyl orange using Zn@[Fe(CN)₅NO] complex under sunlight irradiation* telah memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan kajian degradasi senyawa *azo* menggunakan fotokatalis berbasis logam transisi. Artikel asli tersebut menjadi sumber inspirasi sekaligus pijakan ilmiah dalam menyusun tinjauan kritis dan pengembangan diskusi dalam tulisan ini.

Akhir kata, penulis berharap artikel ini dapat menjadi salah satu kontribusi kecil yang bermanfaat dalam pengembangan ilmu kimia, khususnya dalam bidang fotokatalisis dan pengolahan limbah tekstil berbasis teknologi ramah lingkungan.

REFERENSI

- Abd El-Aziz, H. M., Zayed, M. A., & Abdel-Gawad, S. A. (2024). Adsorptive removal of Direct Red 31 and Direct Orange 26 azo dyes from aqueous solutions using Ficus nano zero valent copper: Linear, non-linear, response surface methodology (RSM), and artificial neural network (ANN) modeling. *Adsorption Science & Technology*, 42. <https://doi.org/10.1177/02636174241256849>
- Abdelrahman, A. M., Ahmed, N. H. S., Fahmi, A. A., Saad, G. R., & Naoum, M. M. (2020a). Synthesis and mesophase behaviour of four-ring azo-ester-azo compounds bearing two-terminal alkoxy groups in different lengths and proportions. *Liquid Crystals*, 47(12), 1772–1783. <https://doi.org/10.1080/02678292.2020.1727035>
- Abdelrahman, A. M., Ahmed, N. H. S., Fahmi, A. A., Saad, G. R., & Naoum, M. M. (2020b). Synthesis and mesophase behaviour of four-ring azo-ester-azo compounds bearing two-terminal alkoxy groups in different lengths and proportions. *Liquid Crystals*, 47(12), 1772–1783. <https://doi.org/10.1080/02678292.2020.1727035>
- Alzain, H., Kalimugogo, V., & Hussein, K. (2023). A Review of Environmental Impact of Azo Dyes. *International Journal of Research and Review*, 10(6), 64–689. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20230682>

- Byrd, J. D., & Hood, E. E. (2022). Degradation of Synthetic Dyes with Plant-Produced Manganese Peroxidase and Commercial Laccase. *AATCC Journal of Research*, *9*(1), 49–59.
<https://doi.org/10.1177/23305517211060796>
- Djebli, A., Boudjemaa, A., Bendjeffal, H., Mamine, H., Metidji, T., Bekakria, H., & Bouhedja, Y. (2020). Photocatalytic degradation of methyl orange using Zn@[Fe(CN)₅NO] complex under sunlight irradiation. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, *50*(11), 1115–1122.
<https://doi.org/10.1080/24701556.2020.1735428>
- Jiang, L. L., Li, K., Yan, D. L., Yang, M. F., Ma, L., & Xie, L. Z. (2020). Toxicity Assessment of 4 Azo Dyes in Zebrafish Embryos. *International Journal of Toxicology*, *39*(2), 115–123.
<https://doi.org/10.1177/1091581819898396>