

Karakterisasi Dan Aktivitas Fotokatalitik *Green Synthesized* Nanokomposit Fe_3O_4/TiO_2 Menggunakan Ekstrak Daun Kelor Untuk Degradasi *Methylene Blue*

Dinda Agelia Br Situmorang^{1*}, Ridwan Yusuf Lubis², Miftahul Husnah³

^{1,2,3}Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia

*Email: dindaagelia884@gmail.com

ABSTRACT

This research focuses on Fe_3O_4/TiO_2 nanocomposites (produced through green synthesis) using moringa leaf extract to degrade methylene blue. The coprecipitation synthesis method was successfully employed to synthesize Fe_3O_4/TiO_2 . The aim of this study is to evaluate the effects of characterization results and photocatalytic activity on morphological structure, crystal size, and methylene blue degradation percentage. To assess these parameters, the study compared different mass composition ratios: 2:1, 1:1, and 1:2. The samples were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), and UV-Vis Spectrophotometry. SEM results indicated that agglomeration occurred in the 1:2 mass ratio variation. XRD analysis showed that as the mass ratio increased, the crystal size decreased, with crystal sizes recorded at 30.71 nm, 28.38 nm, and 28.59 nm. UV-Vis results demonstrated that higher mass ratios corresponded to higher degradation percentages, reaching up to 97.80% for the FTMO1:2 sample.

Keywords: Nanocomposite, Fe_3O_4/TiO_2 , green synthesized, photocatalyst, Methylene Blue

PENDAHULUAN

Air limbah telah menjadi masalah penting di dunia ini. Kontributor terbesar air limbah adalah industri tekstil, percetakan, dan manufaktur lainnya. Secara khusus, air limbah dari industri tekstil mengandung pewarna organik dengan molekul aromatik kompleks seperti metilen biru yang tidak terurai secara hayati dan sulit dihilangkan secara alami, metilen biru menyebabkan masalah serius bagi lingkungan alam, kesehatan manusia, dan kelangkaan air yang parah jika tidak ditangani dengan baik [1]. Oleh karena itu, salah satu persyaratan utama selama pengolahan limbah adalah penghapusan atau degradasi metilen biru [2].

Proses oksidasi lanjutan muncul sebagai alternatif yang efektif berkat reaksi redoks dalam proses ini, yang dapat memecah rantai kimia limbah menjadi molekul yang lebih sederhana [3]. Teknik yang paling umum digunakan dalam oksidasi lanjutan adalah fotokatalisis, di mana cahaya digunakan sebagai energi eksternal untuk menghasilkan elektron-hole. Peristiwa ini menghasilkan reaksi redoks dengan air, yang memungkinkan spesies teroksidasi yang kuat, seperti radikal hidroksil ($\bullet OH$), untuk memecah makromolekul dan memutus rantai kimia dari pewarna. Reaksi ini terjadi ketika suatu oksidator digabungkan dengan cahaya ultraviolet (UV) atau cahaya tampak dan suatu katalis, seperti ion logam atau semikonduktor [4].

Reaksi fotokatalitik mengacu pada proses di mana fotokatalis itu sendiri tidak berubah ketika disinari dengan cahaya; sebaliknya, ia mengubah energi cahaya menjadi energi kimia untuk mendorong produksi atau penguraian senyawa [5].

Magnetit sering kali dikombinasikan dengan bahan semikonduktor TiO_2 sebagai fotokatalis untuk mendegradasi pewarna metilen biru. TiO_2 memiliki aktivitas fotokatalitik yang tinggi ketika terkena cahaya UV, yang menjadikannya sebagai katalis untuk berbagai reaksi kimia, termasuk degradasi polutan organik [6]. TiO_2 memiliki energi celah pita yang sempit (anatase = 3,2 eV dan rutil = 3,4 eV [7]. Namun demikian, nano- TiO_2 memiliki kelemahan yakni sulit untuk dipisahkan dan didaur ulang setelah pengolahan air limbah. Selain itu, nano- TiO_2 memiliki kecenderungan kuat untuk menggumpal yang akan menurunkan aktivitas fotokatalitik [8].

Akibatnya, berbagai strategi telah dilakukan untuk mengatasi keterbatasan ini, termasuk menggunakan cairan ionik dalam fase sintesis TiO_2 , aplikasi berbagai ion logam, aplikasi logam mulia atau anion, penggabungan semikonduktor, co-doping, dan modifikasi permukaan. Oksida besi telah banyak dipertimbangkan karena kurang toksik dan lebih ramah lingkungan dibandingkan oksida logam lainnya. Khususnya, dan Fe_3O_4 sering digunakan karena biaya rendah, ketersediaan,

sifat magnetik, pengaturan yang sederhana, dan kemampuan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik [9].

Magnetit (Fe_3O_4) dalam kombinasi dengan TiO_2 dapat digunakan sebagai adsorben yang mampu menyerap atau menahan molekul atau partikel lain pada permukaannya. Sifat kuat Fe_3O_4 menjadikannya sangat berguna sebagai adsorben, terutama dalam aplikasi pengolahan air dan limbah [10].

Nanopartikel magnetik dan bahan semikonduktor dapat digabungkan melalui berbagai teknik sintesis seperti hidrotermal, sol-gel, dan kopresipitasi. Namun, teknik-teknik ini memerlukan beberapa kondisi atau bahan yang meningkatkan biaya proses atau menggunakan bahan baku yang beracun, yang membuat proses sintesis tidak aman atau tidak ramah lingkungan [11]. Metode *green synthesis* yang melibatkan ekstrak tanaman merupakan solusi yang sangat baik untuk pengolahan limbah. Karena biaya yang efektif, tidak beracun, dan ramah lingkungan, metode *green synthesis* telah menarik banyak perhatian baru-baru ini. Sintesis nanopartikel dengan berbagai ekstrak tanaman telah dilakukan dalam beberapa penelitian sebelumnya [12]. Ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) adalah tanaman yang sesuai untuk sintesis nanopartikel karena daun kelor (*Moringa oleifera*) mengandung banyak protein, tanin, alkaloid, dan flavonoid yang bertindak sebagai agen pereduksi dan stabilisator. Untuk mencapai tujuan ini, nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ disintesis menggunakan metode kopresipitasi dengan ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) [13].

Menurut penelitian [14] tentang mensintesis nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ menggunakan metode *green synthesized* yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelor dengan sintesis metode kopresipitasi untuk degradasi metilen biru. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa nilai energi celah pita meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi dari TiO_2 dan berimbas kepada efektivitas degradasi limbah pewarna metilen biru. Parameter yang dipakai dalam penelitian tersebut adalah parameter konsentrasi dari katalis dan massa katalis saat pengujian degradasi metilen biru dibuat konstan. Efisiensi degradasi metilen biru optimal untuk $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ pada konsentrasi 1:7 mencapai degradasi 99,9% selama dua jam untuk serapan setiap 20 menit. Karena potensi magnetik dari nanopartikel yang disintesis, mereka dapat didaur ulang hingga empat kali tanpa kehilangan aktivitas yang signifikan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakterisasi dan aktivitas fotokatalitik terhadap variasi massa nanokomposit *green synthesized* $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ untuk mendegradasi *methylene blue* dengan berdasarkan parameter pengujian yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *X-ray diffractometry* (XRD), dan Spektrofotometer UV-Vis.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kopresipitasi, dan juga melakukan pendekatan secara kuantitatif. Nanokomposit disintesis dengan mencampurkan material magnetit Fe_3O_4 dengan TiO_2 . Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli-Agustus Tahun 2024. Proses pembuatan nanokomposit dilakukan di Laboratorium Ilmu Dasar Universitas Sumatera Utara jalan Tridharma No.7 Kampus Universitas Sumatera Utara, Proses pengujian SEM dan XRD dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Syiah Kuala. Beralamat di jalan Syech Abdurrauf No. 10 Darussalam Banda Aceh, Aceh. Proses pengujian UV-VIS dan FTIR dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) UGM. Beralamat di jalan Kaliurang Km. 4 Sekip Utara, Sendowo, Sinduadi, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat-alat gelas, spatula, neraca analitik, *magnetic stirrer*, botol semprot, cawan krusibel, kertas saring whatman, *furnace*, magnet.

Material

Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97%, Titanium (IV) Oxide Merck 97%, *Methylene Blue* ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}$), bubuk daun kelor (*Moringa oleifera*) dari Timur Rasa Indonesia, Ethanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), Aquabides, Aquadest.

Sintesis Larutan Daun Kelor (*Moringa oleifera*)

Disiapkan bubuk daun kelor sebanyak 5 g, lalu larutkan dengan *aquadest* sebanyak 60 ml, diaduk selama 60 menit pada suhu 60°C dengan kecepatan 600 rpm, didinginkan hingga suhu ruang, kemudian lakukan proses penyaringan menggunakan *Whatman 01*, dan diletakkan pada lemari es untuk digunakan percobaan selanjutnya agar tidak berjamur.

Tahap Pembuatan *Green Synthesized Nanokomposit Fe₃O₄/TiO₂*

Tahap pembuatan nanokomposit dengan menyiapkan bahan yang diperlukan yaitu Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97%, Titanium (IV) Oxide Merck 97%, larutan daun kelor (*moringa oleifera*), *Ethanol* (CH₃CH₂OH), *Aquabidest*. Dilakukan pembuatan sampel nanokomposit mula-mula larutkan bahan Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97% ke dalam 30 ml *ethanol* dan *stirrer* selama 30 menit dengan suhu ruang dengan kecepatan 600 rpm. Secara bersamaan dilain tempat larutkan Titanium (IV) Oxide Merck 97% dicampur dengan *ethanol* sebanyak 20 ml *stirrer* selama 30 menit dengan suhu ruang dengan kecepatan 600 rpm. Kemudian masukkan larutan TiO₂ ke dalam larutan Fe₃O₄ lalu *stirrer* kembali selama 90 menit suhu 60 °C dengan kecepatan 600 rpm dan teteskan larutan daun kelor tetes demi tetes, kemudian dipisahkan dengan magnet eksternal dan dicuci dengan *ethanol* 50 ml dan *aquabidest* 50 ml hingga pH netral kemudian dioven pada suhu 100 °C selama 2 jam dan kalsinasi menggunakan *furnace* dengan suhu 500°C selama 3 jam kemudian digerus dengan menggunakan mortar selama 1 jam. Selanjutnya lakukan percobaan dengan perbandingan variasi massa molar nanokomposit Fe₃O₄/TiO₂ masing-masing 2:1, 1:1, dan 1:2.

Nanokomposit diidentifikasi morfologi, ukuran kristal dan sifat fotokatalitiknya untuk mengetahui karakteristik dari nanokomposit ini menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM), *X-ray diffractometry* (XRD), dan Spektrofotometer UV-Vis.

1. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

SEM merupakan metode yang digunakan untuk pengamatan morfologi permukaan dan unsur kandungan berbagai jenis sampel padat dengan prinsip penembakan elektron. Prinsip kerja SEM adalah menembakkan permukaan benda dengan menggunakan berkas elektron berenergi tinggi sehingga permukaan benda haruslah konduktif. Oleh karena itu permukaan benda haruslah bersifat konduktif sehingga untuk karakterisasi material non konduktif terlebih dahulu harus dilapisi oleh material konduktif. Permukaan benda yang dikenai berkas elektron akan memantulkan kembali berkas elektron tersebut atau menghasilkan elektron sekunder ke segala arah. Tetapi hanya ada satu arah dimana berkas dipantulkan dengan intensitas tertinggi. Detektor di dalam SEM mendeteksi elektron yang dipantulkan dan menentukan lokasi berkas yang dipantulkan dengan intensitas tertinggi [15].



Gambar 1. Alat SEM

2. *X-ray diffractometry* (XRD)

XRD merupakan metode yang baik untuk mempelajari nanomaterial (bahan dengan setidaknya satu fitur struktural dimensi dalam kisaran 1-100 nm. Panjang gelombang sinar-X menyala skala atom, jadi difraksi sinar-X (XRD) adalah alat utamanya menyelidiki struktur bahan nano. Difraktogram sinar-X dari bahan nano memberikan banyak informasi - mulai dari komposisi

fase hingga ukuran kristalit, dari kisi regangan ke orientasi kristalografi [16] untuk mengetahui ukuran kristal dari Fe_3O_4/TiO_2 . Ukuran kristal rata-rata dapat dihitung dengan pelebaran puncak puncak difraksi menggunakan persamaan *Scherrer*:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- D = Ukuran kristal (nm)
- K = Konstanta kristal (0,94)
- λ = Panjang gelombang (1,54 Å)
- β = FWHM
- θ = Sudut puncak (°)

Dimana D adalah ukuran kristal, λ adalah panjang gelombang dari berkas sinar-X yang datang, β adalah lebar penuh pada setengah dari intensitas maksimum puncak refleksi, dan K adalah konstanta *Scherrer*.



Gambar 2. Alat XRD

3. Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis digunakan sebagai alat uji secara kualitatif yang akan menampilkan absorbansi maksimal pada panjang gelombang tertentu menunjukkan karakter tertentu dari suatu senyawa atau partikel dimana sumber radiasi tertentu dilewatkan pada monokromator sehingga panjang gelombang yang akan dilewatkan pada sampel menjadi spesifik. Lalu detektor akan menyerap radiasi yang dipancarkan sampel. Spektrofotometer UV-Vis digunakan sebagai alat uji secara kualitatif yang akan menampilkan absorbansi maksimal pada panjang gelombang tertentu menunjukkan karakter tertentu dari suatu senyawa atau partikel.

Konsentrasi zat warna juga dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis. Persentase (%) degradasi *methylene blue* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Degradasi (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Di mana C_0 adalah konsentrasi awal dan C_t adalah konsentrasi setelah penyinaran.



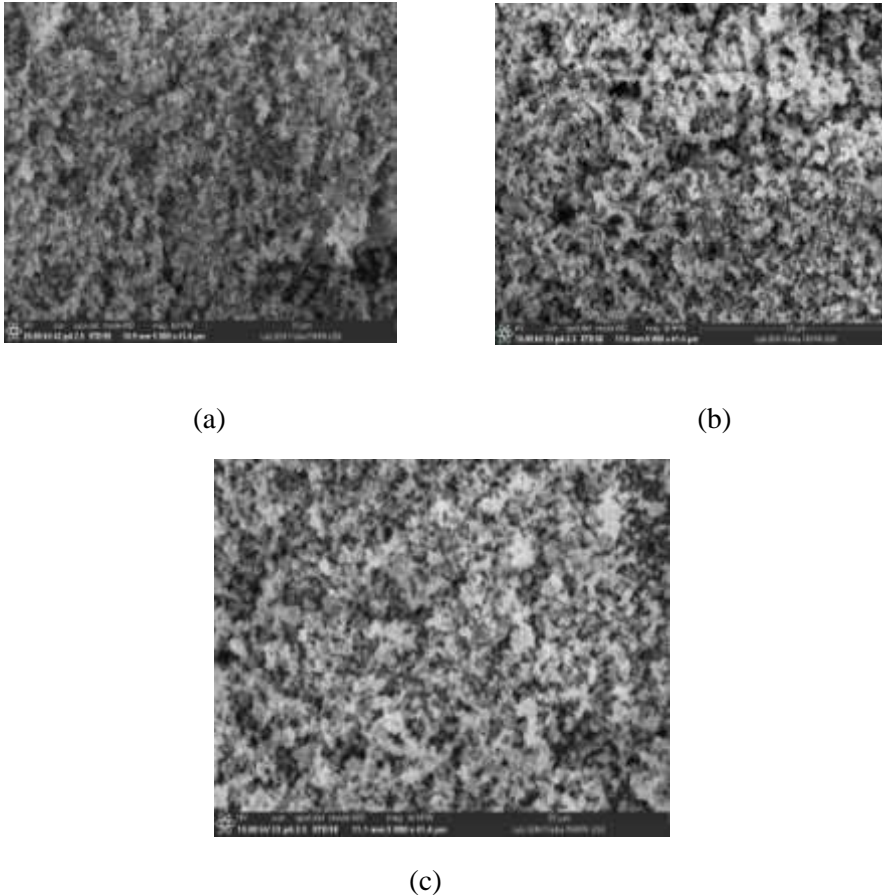
Gambar 3 Alat UV-Vis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis material fotokatalis dengan bahan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ yang disintesis menggunakan ekstrak daun kelor (*Moringa oliefera*) dengan metode kopresipitasi dengan perbandingan variasi massa molar yaitu 2:1, 1:1, dan 1:2, dan diberi kode sampel FTMO2:1, FTMO1:1, dan FTMO1:2. Hasil karakterisasi menggunakan SEM, XRD dan UV-Vis dijelaskan sebagai berikut:

a. SEM

Hasil SEM memperlihatkan morfologi dari bahan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ pada masing-masing sampel, dengan perbesaran 5000 kali dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. SEM perbesaran 5000 kali (a) FTMO2:1, (b) FTMO1:1, dan (c) FTMO1:2

Berdasarkan hasil Gambar 4. Ketiga sampel menunjukkan perbedaan morfologi. Sampel (a) FTMO2:1 menunjukkan sedikit aglomerisasi, dengan partikel tampak lebih terpisah, menandakan kecenderungan aglomerasi yang rendah dan permukaan yang lebih homogen. Sebaliknya, sampel (b) FTMO1:1 memiliki tingkat aglomerisasi tinggi, dengan kumpulan partikel yang lebih besar dan tekstur kurang homogeny dan tampak lebih menyatu, dan partikel tampak lebih kasar dan ada lebih banyak variasi ukuran. Sampel (c) FTMO1:2 menunjukkan aglomerisasi paling signifikan, dengan partikel yang tidak seragam, permukaan kasar, dan ukuran yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin bertambahnya variasi massa antara Fe_3O_4 dan TiO_2 , semakin tinggi kecenderungan aglomerisasi.

b. XRD

XRD digunakan untuk menghitung ukuran kristal yang dapat dihitung dari persamaan *Scherrer*, dapat dilihat hasil perhitungan ukuran kristal pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran kristal sampel material fotokatalis

Sampel	FWHM (radian)	D (nm)
FTMO2:1	0,28373	30,71
FTMO1:1	0,30705	28,38
FTMO1:2	0,30472	28,59

Berdasarkan Tabel 1 ukuran kristal yang dihitung untuk sampel FTMO2:1, FTMO1:1, dan FTMO1:2 masing-masing adalah 30,71 nm, 28,38 nm, dan 28,59 nm. Ini menunjukkan bahwa sampel FTMO2:1 memiliki ukuran kristal yang lebih besar dibandingkan dengan FTMO1:1 dan FTMO1:2, meskipun perbedaan ukuran kristal di antara ketiga sampel tidak terlalu signifikan. Pengaruh variasi massa mempengaruhi nilai ukuran kristal yang dapat dilihat dengan semakin bertambahnya variasi massa dari TiO₂ maka semakin menurun pula nilai ukuran kristal. Pada ukuran kristal yang besar, atom-atom cenderung lebih teratur, karena kristal tumbuh dengan sedikit cacat. Semakin besar kristal maka semakin teratur pula penyusunan atom di dalamnya. Hal ini dikarenakan apabila variasi massa semakin tinggi, maka atom-atom yang terdapat di dalam senyawa TiO₂ akan berdifusi secara cepat.

c. UV-Vis

UV-Vis digunakan untuk melihat besar persentase degradasi dari *methylene blue* dengan menggunakan rumus pada Persamaan 2 dapat dilihat nilai persentase degradasi pada Tabel 2

Tabel 2. Persentase degradasi *methylene blue*

Sampel	Absorbasnsi UV-Vis 663 (nm) metilen biru	Absorbasnsi UV-Vis 663 (nm) sampel	Degradasi (%)
FTMO2:1	2,029	0,062	96,94
FTMO1:1	2,029	0,057	97,20
FTMO1:2	2,029	0,045	97,80



Gambar 5. Fotodegradasi *methylene blue* dengan katalis Fe₃O₄/TiO₂

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa pengaruh variasi massa memengaruhi efisiensi katalis dalam mendegradasi zat warna methylene blue. Perbedaan disetiap botol FTMO2:1, FTMO1:1, dan FTMO1:2 dapat diamati bahwa semakin bertambahnya variasi massa maka struktur dan aktivitas katalis dapat berubah, yang berpotensi meningkatkan persentase degradasi dengan afisiensi absorbs masing-masing sampel sebesar 96,94%, 97,20%, 97,80%.

KESIMPULAN

Karakterisasi dan aktivitas fotokatalitik terhadap variasi massa nanokomposit *green synthesized* Fe₃O₄/TiO₂ yang dieskrak menggunakan larutan daun kelor (*Moringa oliefera*) untuk degradasi *methylene blue* terlihat dari hasil uji SEM, dimana yang diketahui bahwa semakin bertambahnya variasi massa maka semakin besar kecenderungan terjadinya aglomerisasi. Hal ini


diperkuat oleh hasil pengujian XRD yang menunjukkan bahwa semakin bertambahnya variasi massa tidak mempengaruhi jarak antar atom tetapi berpengaruh pada ukuran kristal untuk sampel FTMO2:1, FTMO1:1, dan FTMO1:2 masing-masing ukuran kristal adalah 30,71 nm, 28,38 nm, dan 28,59 nm. Selain itu, pengujian menggunakan UV-Vis menunjukkan bahwa persentase degradasi sampel meningkat seiring bertambahnya variasi massa maka semakin tinggi pula nilai persentase degradasi pada sampel, pada sampel FTMO1:2 memiliki persentase degradasi paling tinggi yaitu 97,80%.

Saran;

Rekomendasi untuk penelitian berikutnya adalah membuat perbandingan katalis dan waktu yang optimum pada tahap degradasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. K. Sari, R. M. Tumbelaka, H. Ardiyanti, N. I. Istiqomah, Chotimah, and E. Suharyadi, "Green synthesis of magnetically separable and reusable Fe₃O₄/Cdots nanocomposites photocatalyst utilizing Moringa oleifera extract and watermelon peel for rapid dye degradation," *Carbon Resources Conversion*, vol. 6, no. 4, pp. 274–286, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.crcon.2023.04.003.
- [2] R. M. Tumbelaka, N. I. Istiqomah, N. Mabarroh, and E. Suharyadi, "Green Synthesis of Fe₃O₄/TiO₂ Nanoparticles Using Extracts of Moringa oleifera: Microstructural and Optical Properties," in *Solid State Phenomena*, vol. 332, Trans Tech Publications Ltd, 2022, pp. 91–99. doi: 10.4028/p-oi81sf.
- [3] A. N. Kadam *et al.*, "Facile synthesis of Ag-ZnO core-shell nanostructures with enhanced photocatalytic activity," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 61, pp. 78–86, May 2018, doi: 10.1016/j.jiec.2017.12.003.
- [4] T. de Oliveira Guidolin *et al.*, "Photocatalytic pathway on the degradation of methylene blue from aqueous solutions using magnetite nanoparticles," *J Clean Prod*, vol. 318, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128556.
- [5] H. Yang, B. Yang, W. Chen, and J. Yang, "Preparation and Photocatalytic Activities of TiO₂-Based Composite Catalysts," Oct. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/catal12101263.
- [6] S. Nengsih, S. Nur Abdulmajid, M. Mursal, and Z. Jalil, "Photocatalytic performance of Fe₃O₄-TiO₂ in the degradation of methylene blue dye: Optimizing the usability of natural iron sand," *Mater Sci Energy Technol*, vol. 7, pp. 374–380, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.mset.2024.06.001.
- [7] M. Sadia *et al.*, "Metal doped titania nanoparticles as efficient photocatalyst for dyes degradation," *J King Saud Univ Sci*, vol. 33, no. 2, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jksus.2020.101312.
- [8] Y. Xiang, H. Wang, Y. He, and G. Song, "Efficient degradation of methylene blue by magnetically separable Fe₃O₄/chitosan/TiO₂ nanocomposites," *Desalination Water Treat*, vol. 55, no. 4, pp. 1018–1025, Jul. 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.922441.
- [9] M. N. Borhani, A. Tavakoli, A. M. Mollaei, and T. N. Borhani, "Visible light photodegradation of methylene blue by ionic liquid based TiO₂/Fe₃O₄ nanophotocatalysts," *Opt Mater (Amst)*, vol. 154, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.optmat.2024.115627.
- [10] S. Al-Salihi, M. Bayati, A. M. Jasim, M. M. Fidalgo, and Y. Xing, "Magnetic mesoporous TiO₂/Fe₃O₄ nanocomposite adsorbent for removal of sulfamethazine from water," *Environmental Advances*, vol. 9, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.envadv.2022.100283.
- [11] W. Marimón-Bolívar and E. E. González, "Green synthesis with enhanced magnetization and life cycle assessment of Fe₃O₄ nanoparticles," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 9, pp. 58–66, May 2018, doi: 10.1016/j.enmm.2017.12.003.
- [12] K. Mishra, N. Basavegowda, and Y. R. Lee, "Access to enhanced catalytic core-shell CuO-Pd nanoparticles for the organic transformations," *RSC Adv*, vol. 6, no. 33, pp. 27974–27982, 2016, doi: 10.1039/c6ra03883b.

- ◆ 
- [13] R. Ahmad Fauzi, N. Imani Istiqomah, E. Kurnia Sari, E. Suharyadi, and H. Aliah, “Concentration Dependences of Photocatalytic Activity in Green-Synthesis Fe₃O₄/TiO₂Nanocomposite Utilizing Moringa Oleifera for Methylene Blue Dye Degradation,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1742-6596/2696/1/012011.
- [14] R. M. Tumbelaka, N. I. Istiqomah, T. Kato, D. Oshima, and E. Suharyadi, “High reusability of green-synthesized Fe₃O₄/TiO₂ photocatalyst nanoparticles for efficient degradation of methylene blue dye,” *Mater Today Commun*, vol. 33, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104450.
- [15] L. A. Didik and I. Artikel Abstrak, “Indonesian Physical Review PENENTUAN UKURAN BUTIR KRISTAL CuCr 0,98 Ni 0,02 O 2 DENGAN MENGGUNAKAN X-RAY DIFFRACTION (XRD) DAN SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM),” *Indonesian Physical Review*, vol. 3, no. 1, pp. 6–14, 2020, doi: 10.29303/ip.
- [16] R. K. Sharma, S. Sharma, S. Dutta, R. Zboril, and M. B. Gawande, “Silica-nanosphere-based organic-inorganic hybrid nanomaterials: Synthesis, functionalization and applications in catalysis,” Jun. 01, 2015, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/c5gc00381d.