

## Material Nanopartikel Fotokatalis $Fe_3O_4/SiO_2/TiO_2$ Untuk Degradasi Methylene Blue

Nurma Lenni<sup>1\*</sup>, Ridwan Yusuf Lubis<sup>2</sup>, Masthura<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>) Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia

\*Email: [nurmalennipsb@gmail.com](mailto:nurmalennipsb@gmail.com)

### ABSTRACT

This study aims to synthesize  $Fe_3O_4/SiO_2/TiO_2$  photocatalytic material using the coprecipitation method with variations in calcination temperature and to investigate the effect of calcination temperature on the material characteristics as well as its ability to degrade methylene blue. The photocatalytic material was synthesized with a mass ratio of  $Fe_3O_4/SiO_2/TiO_2$  of 3:2:2 and calcined at temperatures of 500 °C, 550 °C, and 600 °C. The material characterization was performed using X-Ray Diffractometer (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), and Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectrophotometer. XRD results showed that increasing the calcination temperature led to an increase in crystal size from 28.01 nm at 500°C to 30.06 nm at 600°C. SEM analysis revealed morphological changes with an increase in particle size and agglomeration at higher temperatures, resulting in a denser and more porous surface. UV-Vis results showed that the FST600 sample, calcined at 600°C, exhibited the highest methylene blue degradation rate, at 99.26%. This study demonstrates that higher calcination temperatures improve crystal size, enhance morphology, and increase the photocatalytic performance of  $Fe_3O_4/SiO_2/TiO_2$  in methylene blue degradation.

**Keywords:**  $Fe_3O_4/SiO_2/TiO_2$ , Photocatalysis, Coprecipitation, Methylene Blue

### PENDAHULUAN

Air adalah sumber daya alam yang paling penting yang diperlukan oleh kehidupan manusia untuk bertahan di bumi [1]. Makhluk hidup terdiri dari air dan akan selalu hidup di lingkungan yang didominasi oleh air. Oleh karena itu, perlu untuk mengontrol kuantitas dan kualitas air [2]. Sumber air bersih di dunia sangat terbatas. Di sisi lain, perkembangan industri kimia telah membatasi sumber-sumber ini. Oleh karena itu, polutan lingkungan menjadi isu penting dalam masyarakat manusia saat ini. Material beracun dan pewarna adalah dua kelompok utama senyawa berbahaya dalam limbah air [3]. Selain itu, sumber air tawar yang tidak mencukupi menyebabkan kelangkaan air untuk kebutuhan manusia dan lingkungan. Sumber air dapat tercemar oleh berbagai macam zat, termasuk mikroorganisme patogen, bahan kimia beracun, minyak, sedimen, dan limbah organik. Dari semua itu, persentase tertinggi berasal dari limbah beracun yang dikeluarkan oleh industri [4]. Dalam beberapa tahun terakhir, air limbah industri dari sektor tekstil yang mengandung zat pewarna telah menjadi masalah yang sangat serius di wilayah berkembang. Limbah ini sulit untuk diolah karena komposisinya yang bervariasi dan mengandung polutan yang sulit terurai [5]. Di antara berbagai jenis pewarna, methylene blue (MB) sering ditemukan dalam limbah tekstil [6].

Methylene blue (MB) adalah pewarna organik kationik yang banyak digunakan dalam industri tekstil dan kertas, serta memiliki aplikasi dalam bidang medis. Meskipun dianggap sebagai pewarna organik, MB adalah salah satu jenis pewarna yang dikategorikan sebagai bahan kimia berbahaya bagi manusia dan hewan dengan kemampuan untuk membakar organ, seperti mata dan kulit jika digunakan secara berlebihan. Oleh karena itu, salah satu persyaratan utama selama pengolahan air limbah adalah penghilangan atau degradasi MB. Teknik yang paling umum digunakan dalam oksidasi tingkat lanjut adalah fotokatalisis, di mana cahaya digunakan sebagai energi eksternal untuk pembentukan elektron-lubang [7]. Saat ini, proses fotokatalisis memungkinkan dilakukannya degradasi berbagai polutan organik secara efisien dalam limbah berair [8]. Fotokatalisis adalah teknik ramah lingkungan yang sederhana untuk dekomposisi pewarna dalam limbah air [9], dimana cahaya digunakan sebagai energi eksternal untuk pembentukan elektron-hole. Peristiwa ini menghasilkan reaksi redoks dengan air, yang memungkinkan spesies teroksidasi kuat, seperti radikal hidroksil ( $\bullet OH$ ), untuk memecah

makromolekul dan memutus rantai kimia pewarna. Reaksi ini terjadi ketika oksida dikombinasikan dengan sinar ultraviolet (UV) atau cahaya tampak dan katalis, seperti ion logam atau semikonduktor [10].

Di antara fotokatalis semikonduktor ini,  $\text{TiO}_2$  telah menunjukkan dirinya sebagai fotokatalis yang paling menjanjikan dan paling umum digunakan karena biaya rendah, ramah lingkungan, kapasitas kimia yang tinggi, kapasitas termal yang baik, serta kemampuannya yang efektif dalam menghancurkan struktur pewarna polutan. Sebaliknya, di antara nanomaterial magnetik lainnya, nanopartikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  telah menarik perhatian karena luas permukaannya yang besar, toksisitas yang rendah, serta sifat listrik, kimia, optik, dan supermagnetiknya yang efektif. Oleh karena itu, dalam bidang fotokatalis sintesis,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dianggap sebagai penyedia medan magnet yang tepat [11]. Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) dalam kombinasi dengan  $\text{TiO}_2$  dapat digunakan sebagai adsorben yang dapat menyerap atau menahan molekul atau partikel lain pada permukaannya [12].

$\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  merupakan katalis potensial dalam pengolahan air limbah, terutama dengan komposisi polutan kompleks seperti air limbah pewarnaan tekstil. Dengan demikian, tujuan utama penelitian ini adalah penyederhanaan proses sintesis  $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$  untuk aplikasi praktis, dan peningkatan efisiensi pengolahan dengan aerasi dan penambahan oksidan [13]. Silika dioksida dipilih untuk berperan sebagai penghalang dalam memisahkan inti magnetik dari katalis  $\text{TiO}_2$ , karena kompatibilitasnya dengan kedua material oksida serta untuk mencegah oksidasi inti besi oksida oleh titanium dioksida yang dapat mengurangi sifat kemagnetannya. Peran silika tidak hanya sebagai pengikat, tetapi juga untuk memastikan luas permukaan yang lebih besar, sehingga meningkatkan kinerja fotokatalitik serta mempermudah pemisahan dan pemulihan katalis [14]. Nanopartikel magnetik dan bahan semikonduktor dapat dikombinasikan melalui metode kopresipitasi. Prinsip dasar metode kopresipitasi adalah pemutusan ikatan kontinu pada senyawa logam dalam bentuk larutan, tanpa memperhatikan mekanisme rinci yang terlibat. Metode ini menghasilkan material padat yang terbentuk dari presipitasi senyawa yang awalnya berada dalam bentuk cair [15].

Tinjauan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap karakteristik nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  untuk mendegradasi *methylene blue* dengan berdasarkan parameter pengujian yaitu *X-Ray Diffractometer (XRD)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, dan *Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spektrofotometer*.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ini yaitu menggunakan metode kopresipitasi juga melakukan pendekatan secara kuantitatif. Nanopartikel disintesis dengan mencampurkan material magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ . Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli-Agustus Tahun 2024. Proses pembuatan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dilakukan di Laboratorium Ilmu Dasar Universitas Sumatera Utara, beralamat di jalan Dr. T. Mansur No. 9. Padang Bulan, Kecamatan Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara. Proses pengujian SEM Dan XRD dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Syiah Kuala, jalan Syech Abdurrauf No. 10 Darussalam Banda Aceh, Aceh. Proses pengujian UV-Vis dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) UGM. Beralamat di jalan Kaliurang km. 4 Sekip Utara, Sendowo, Sinduadi, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewah Yogyakarta.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat-alat gelas, spatula, neraca analitik, magnetic stirrer, botol semprot, cawan krusibel, kertas saring whatman, oven, furnace, magnet, mortar, pH indikator, termometer. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97%, Silikon Dioksida ( $\text{SiO}_2$  ID Merck : 1.13126.0500), Titanium Dioksida ( $\text{TiO}_2$  ID Merck : 1.00808.1000), Etanol, Aquabidest, Aquadest dan Methylene Blue. Sintesis  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  terdiri dari 3 gr Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97% ditambahkan etanol sebanyak 50 ml diaduk selama 1 jam dengan suhu  $30^\circ\text{C}$  pada kecepatan 600 rpm. Ditambahkan 2 gr  $\text{SiO}_2$  diaduk selama 3 jam pada suhu  $30^\circ\text{C}$  pada kecepatan 600 rpm. Endapan dicuci dengan etanol dan aquabidest. Kemudian dilakukan pengovenan pada suhu  $100^\circ\text{C}$  selama 150 menit. Setelah itu digerus selama 1 jam untuk mendapatkan serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ . Sintesis  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  terdiri dari serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  ditambahkan etanol sebanyak 100 ml diaduk selama 30 menit dengan kecepatan

600 rpm pada suhu 70°C. Ditambahkan 2 gr TiO<sub>2</sub> kedalam larutan sebelumnya dan diaduk selama 8 jam. Kemudian endapan dicuci dengan etanol dan aquabidest sampai pH netral. Kemudian di oven pada suhu 60 °C selama 8 jam. Kemudian dilakukan kalsinasi pada suhu 500 °C, 550 °C dan 600 °C selama 1 jam. Proses degradasi *methylene blue* terdiri dari 50 ml larutan *methylene blue* dan 50 mg Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> ditambahkan ke dalam larutan dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit. Selanjutnya, sampel dijemur dibawah sinar matahari selama 8 jam untuk memulai fotodegradasi *methylene blue*. Selanjutnya, endapan yang terbentuk dipisahkan dari larutan *methylene blue* menggunakan magnet dan kertas saring. Larutan hasil pemisahan kemudian dianalisis menggunakan UV-Vis.

Karakteristik nanopartikel dianalisis melalui identifikasi fasa kristalin, morfologi, dan sifat fotokatalitiknya menggunakan alat *X-Ray Diffractometer (XRD)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, dan *Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spektrofotometer*.

### 1. *X-Ray Diffractometer (XRD)*

XRD dapat memberikan informasi tambahan mengenai ukuran kristal. 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 1. Alat XRD

### 2. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

SEM merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui morfologi dan analisis permukaan material. Karakteristik bahan menggunakan SEM dimanfaatkan untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran butiran, cacat struktural, dan komposisi pencemaran suatu bahan. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini dapat dilihat secara langsung pada hasil SEM yang menyajikan bentuk tiga dimensi berupa gambar atau foto. Mikroskop ini dapat diperbesar sekitar 1.000 sampai 40.000 kali. Hasil SEM yang berupa gambar morfologi menyajikan bentuk permukaan bahan.



Gambar 2. Alat SEM

### 3. *Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectofotometer*

UV-Vis adalah alat yang digunakan untuk mengukur panjang gelombang, intensitas sinar ultraviolet dan cahaya tampak yang terabsorpsi pada sampel. Konsentrasi zat warna dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis. Persentase (%) degradasi MB dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Degradasi (\%)} = \left( \frac{c_0 - c_t}{c_0} \right) \times 100 \% \dots\dots\dots(2)$$

Dimana  $C_0$  adalah konsentrasi awal dan  $C_t$  adalah konsentrasi setelah penyinaran.



Gambar 3. Alat SEM

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan sintesis material fotokatalis dengan bahan  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dengan metode kopresipitasi. Sampel yang digunakan memiliki rasio massa komposisi  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  sebesar 3:2:2. Sampel yang sudah dicampur kemudian mengalami proses kalsinasi pada suhu bervariasi, yaitu 500 °C (FST500), 550 °C (FST550), dan 600 °C (FST600). Material yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffractometer (XRD)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, dan *Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectofotometer*.

### 1. *X-Ray Diffractometer (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

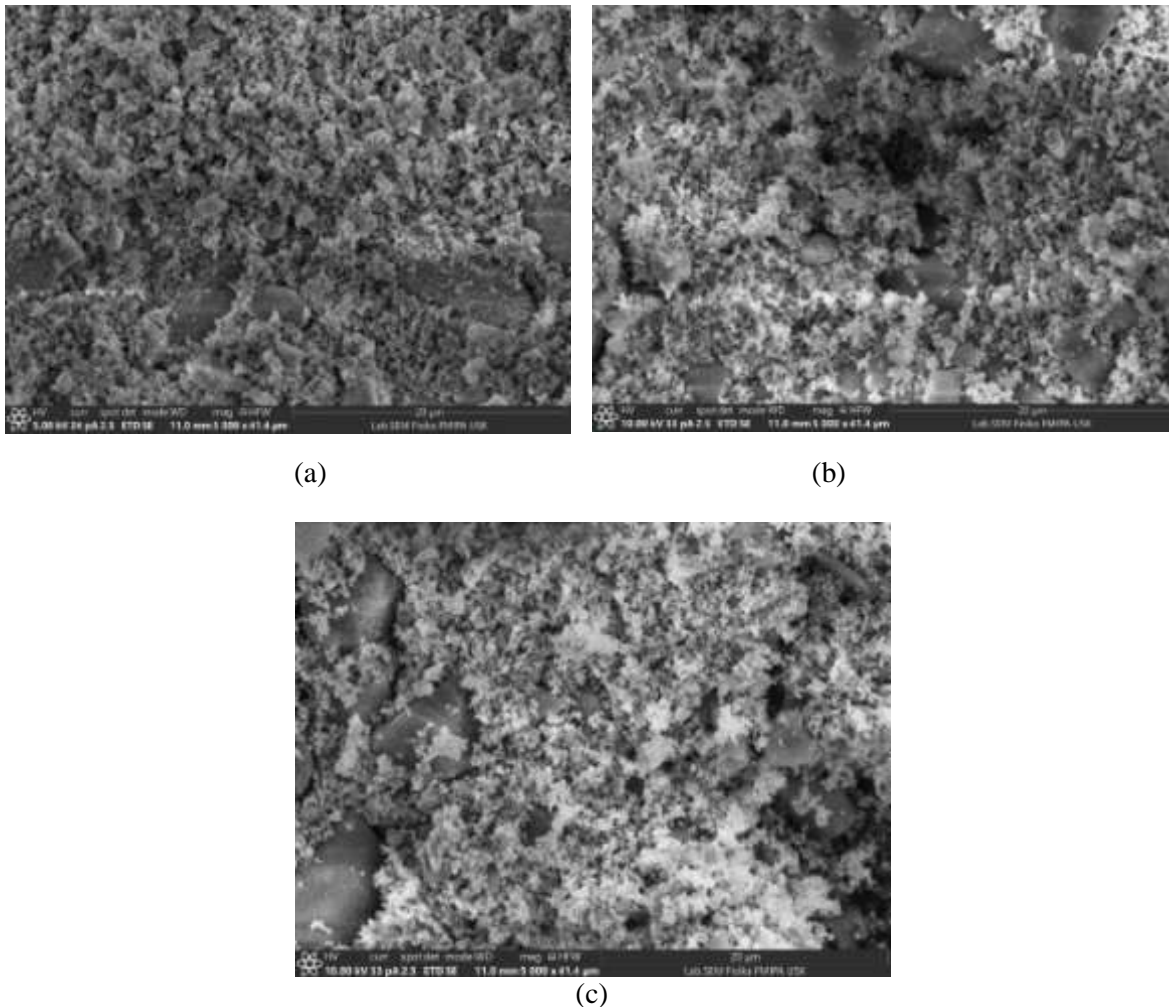
| Sampel | FWHM   | D (nm) |
|--------|--------|--------|
| FST500 | 0,3035 | 28,01  |
| FST550 | 0,2829 | 30,05  |
| FST600 | 0,2829 | 30,06  |

Berdasarkan hasil perhitungan ukuran kristal pada Tabel 1 dengan sampel FST500, FST550 dan FST600 mendapatkan nilai ukuran kristal berukuran masing-masing 28,01 nm, 30,05 nm, dan 30,06 nm. Semakin kecil nilai *Full Width at Half Maximum (FWHM)*, semakin besar pula

ukuran kristal. Hal ini menjelaskan bahwa sampel FST600 memiliki nilai ukuran kristal yang lebih besar dari pada FST550 dan FST500 akan tetapi perubahan ukuran kristal yang terjadi tidak terlalu signifikan. Suhu kalsinasi mempengaruhi nilai ukuran kristal yang dapat dilihat dengan semakin bertambahnya suhu kalsinasi maka semakin meningkat pula nilai ukuran kristal. Pada ukuran kristal yang besar, atom-atom cenderung lebih teratur karena kristal tumbuh dengan sedikit cacat. Semakin besar ukuran kristal maka semakin teratur pula penyusunan atom di dalamnya. Hal ini dikarenakan apabila suhu semakin tinggi, maka atom-atom yang terdapat di dalam senyawa  $\text{TiO}_2$  akan berdifusi secara cepat.

## 2. Scanning Electron Microscope (SEM)

Hasil SEM memperlihatkan morfologi dari bahan  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  pada masing-masing sampel, dengan perbesaran 5.000 kali dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. SEM Perbesaran 5.000 kali (a) FST500, (b) FST550, dan (c) FST600

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa ketiga sampel memiliki morfologi yang berbeda. Pada sampel (a) FST500, aglomerisasi tidak tampak secara jelas, dengan struktur partikel yang lebih halus dan distribusi yang lebih homogen, sehingga partikel-partikel kecil menyatu dan membentuk permukaan yang lebih padat dan seragam. Pada sampel (b) FST550 terlihat adanya peningkatan jumlah dan ukuran partikel dibandingkan dengan FST500. Tampak adanya aglomerisasi partikel yang lebih besar, menunjukkan bahwa pada suhu  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  material mulai mengalami perubahan morfologi yang lebih nyata dibandingkan dengan FST500. Pada sampel (c) FST600 mengalami perubahan morfologi paling signifikan, partikel tampak lebih besar dan kasar, manandakan bahwa perlakuan termal pada suhu  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  menyebabkan perubahan besar dalam struktur material. Permukaannya terlihat lebih padat dan berpori dibandingkan dengan sampel FST500 dan FST550.

### 3. Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectrofotometer

UV-Vis bertujuan untuk menentukan persentase degradasi *methylene blue*, yang dihitung berdasarkan rumus pada persamaan 2. Hasil perhitungan persentase degradasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Persentase degradasi *methylene blue*

| Sampel | Absorbansi UV- Vis<br>663 (nm) | Degradasi (%) |
|--------|--------------------------------|---------------|
| FST500 | 0.024                          | 98.82         |
| FST550 | 0.025                          | 98.77         |
| FST600 | 0.015                          | 99.26         |



Gambar 5. Fotodegradasi *Methylene Blue* dengan Katalis  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 5, penurunan absorbansi UV-Vis *methylene blue* 10 ppm pada panjang gelombang 663 nm menunjukkan tingkat fotodegradasi yang signifikan pada setiap sampel. Nilai absorbansi awal sebesar 0,029 mengalami penurunan menjadi 0,024 untuk sampel FST500 dengan persentase degradasi 98,82%, menurun menjadi 0,025 pada sampel FST550 dengan degradasi 98,77%, dan berkurang lebih jauh menjadi 0,015 pada sampel FST600 dengan degradasi 99,26%. Hal ini menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan efektivitas katalis dalam proses fotodegradasi methylene blue, dengan FST600 yang memiliki suhu kalsinasi 600 °C menghasilkan degradasi tertinggi yaitu 99,26%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu kalsinasi dapat memperbaiki efektivitas katalis dalam proses fotodegradasi *methylene blue*. Sampel FST600, yang dikalsinasi pada suhu 600 °C mencapai tingkat degradasi tertinggi sebesar 99,26%.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensintesis material fotokatalis  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  menggunakan metode kopresipitasi dengan variasi suhu kalsinasi yang mempengaruhi sifat-sifat materialnya. Hasil XRD menunjukkan bahwa peningkatan suhu kalsinasi dari 500 °C hingga 600 °C menyebabkan peningkatan ukuran kristal dari 28,01 nm menjadi 30,06 nm karena difusi atom yang lebih cepat pada suhu tinggi, sehingga kristal tumbuh lebih besar dan teratur. Analisis SEM menyatakan bahwa pada suhu kalsinasi lebih tinggi, terjadi perubahan morfologi yang signifikan dengan perbesaran partikel dan peningkatan aglomerasi, yang menghasilkan permukaan lebih padat dan berpori, memperluas area aktif untuk reaksi. Hasil UV-Vis juga menunjukkan peningkatan efektivitas fotokatalis dalam mendegradasi *methylene blue* seiring dengan suhu kalsinasi yang lebih tinggi, dimana FST600 dengan suhu kalsinasi 600 °C menunjukkan tingkat degradasi tertinggi sebesar 99,26%. Secara keseluruhan, peningkatan suhu kalsinasi terbukti dapat memperbesar ukuran kristal, memperbaiki morfologi, dan meningkatkan aktivitas fotokatalitik material  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dalam degradasi *methylene blue*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Singh and P. Bansal, "Fabrication and characterization of needle shaped CuO nanoparticles and their application as photocatalyst for degradation of organic pollutants," *Mater Lett*, vol. 261, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2019.126929.
- [2] S. Mardiyah and S. Sunaryono, "Impact of NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Composition on Methylene Blue Photodegradation by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites," *Journal of Magnetism and Its Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 34–39, Dec. 2021, doi: 10.53533/jma.v1i2.15.
- [3] A. H. Kianfar and M. A. Arayesh, "Synthesis, characterization and investigation of photocatalytic and catalytic applications of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>/CuO nanoparticles for degradation of MB and reduction of nitrophenols," *J Environ Chem Eng*, vol. 8, no. 1, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jece.2019.103640.
- [4] B. M. Barua, M. BHUSHAN, and L. R. Singh, "Study of synthesis and characterization of ZnO, TiO<sub>2</sub>, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles/nanocomposites and evaluation of their photocatalytic dye degradation capabilities against Rhodamine-B and Methylene blue.," Jun. 05, 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-2833375/v1.
- [5] T. A. Kurniawan *et al.*, "Functionalizing TiO<sub>2</sub> with graphene oxide for enhancing photocatalytic degradation of methylene blue (MB) in contaminated wastewater," *J Environ Manage*, vol. 270, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110871.
- [6] Z. Mengting *et al.*, "Applicability of BaTiO<sub>3</sub>/graphene oxide (GO) composite for enhanced photodegradation of methylene blue (MB) in synthetic wastewater under UV–vis irradiation," *Environmental Pollution*, vol. 255, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113182.
- [7] L. I. Jingga *et al.*, "Chemical degradation of methylene blue dye using tio<sub>2</sub>/au nanoparticles," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/nano11061605.
- [8] S. Alkaykh, A. Mbarek, and E. E. Ali-Shattle, "Photocatalytic degradation of methylene blue dye in aqueous solution by MnTiO<sub>3</sub> nanoparticles under sunlight irradiation," *Heliyon*, vol. 6, no. 4, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03663.
- [9] M. K. Ahmed, M. E. El-Naggar, A. Aldalbahi, M. H. El-Newehy, and A. A. Menazea, "Methylene blue degradation under visible light of metallic nanoparticles scattered into graphene oxide using laser ablation technique in aqueous solutions," *J Mol Liq*, vol. 315, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.113794.
- [10] R. M. Tumbelaka, N. I. Istiqomah, T. Kato, D. Oshima, and E. Suharyadi, "High reusability of green-synthesized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalyst nanoparticles for efficient degradation of methylene blue dye," *Mater Today Commun*, vol. 33, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104450.
- [11] S. Nengsih, S. Nur Abdulmajid, M. Mursal, and Z. Jalil, "Photocatalytic performance of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 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.
- [12] C. I. Tarcea *et al.*, "Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye Using TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> as Photocatalysts," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jul. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/877/1/012008.
- [13] N. T. Thuy *et al.*, "Treatment of textile dye wastewater by peroxymonosulfate activation using facilely prepared Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@TiO<sub>2</sub> heterogeneous photocatalyst," *Clean (Weinh)*, vol. 52, no. 5, May 2024, doi: 10.1002/clen.202300024.
- [14] R. Ahmad Fauzi, N. Imani Istiqomah, E. Kurnia Sari, E. Suharyadi, and H. Aliah, "Concentration Dependences of Photocatalytic Activity in Green-Synthesis Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>Nanocomposite 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.
- [15] Harsono, Heru. Sintesis Partikel Nano Seng Oksida (ZnO) Doping Mangan (Mn) dengan Metode Kopersipitasi dan Karakteristik Kekristalan serta Sifat Magnetik. Pascal Books, 2022.