

## Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$ Dengan Variasi Suhu Kalsinasi Dalam Mendegradasi *Methylene Blue*

Hilwa Salsabila Lubis<sup>1\*</sup>, Ridwan Yusuf Lubis<sup>2</sup> & Abdul Halim Daulay<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara

\*Email: salsabilalubishilwa@gmail.com

### ABSTRACT

A study has been conducted on the effect of calcination temperature on the characteristics of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$  nanoparticles for the degradation of *Methylene Blue*. The nanoparticles were synthesized using the coprecipitation method. The aim of this research was to investigate the influence of calcination temperature on the morphological structure, crystal size, and degradation percentage of *Methylene Blue*, with variations in calcination temperatures of 400, 500, and 600 °C. The samples were characterized using Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), and UV-Vis Spectrophotometer. The SEM results indicated that at a calcination temperature of 400 °C, agglomeration still occurred. The XRD analysis showed that as the calcination temperature increased, the crystal size decreased, with the sizes for FTC400, FTC500, and FTC600 samples being 30.53 nm, 30.13 nm, and 28.74 nm, respectively. The UV-Vis test results revealed that the higher the calcination temperature, the higher the degradation percentage, reaching 99.40% for the FTC600 sample.

**Keywords:**  $\text{TiO}_2$ ; Co;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; Coprecipitation; Nanoparticles

### PENDAHULUAN

*Methylene Blue* (MB) adalah satu pewarna bersifat beracun, karsinogenik, dan mutagenik. Pewarna ini umumnya digunakan sebagai pewarna sintetis untuk mewarnai kain pada industri pakaian dan sejumlah besar air limbah yang mengandung pewarna *Methylene Blue* (MB) dibuang ke air tanah dan air permukaan juga dapat menyebabkan toksisitas pada manusia dan menjadi ancaman bagi fauna dalam ekosistem perairan maka sangat penting untuk menghilangkan pewarna *Methylene Blue* (MB) [1]. Pengolahan air dengan menggunakan fotokatalisis baru-baru ini telah menarik banyak perhatian. Fotokatalisis merupakan teknologi alternatif dalam pengolahan air limbah industri yang sangat tercemar. Fotokatalis berbasis  $\text{TiO}_2$  sangat efektif dalam mendegradasi polutan organik dari air limbah [2]. Material yang umumnya digunakan dalam proses fotokatalis di antaranya  $\text{TiO}_2$ , ZnO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CdS, GaP, ZnS, dan  $\text{WO}_3$  [3]. Katalis yang digunakan sebagai bahan pada proses fotokatalis biasanya memiliki ciri-ciri partikel yaitu berukuran nanopartikel.

Nanopartikel adalah partikel yang berukuran antara 1 dan 100 nanometer. Sifat material berubah ketika ukuran mereka mendekati skala nano, sifat yang menarik dari nanopartikel adalah disebabkan oleh luas permukaan yang besar pada material. Nanopartikel memiliki sifat optik karena mereka cukup kecil untuk membatasi elektron [4]. Bahan semikonduktor yang sering digunakan dalam proses fotokatalis yang memiliki ukuran partikel nano adalah Titanium dioksida.

Titanium merupakan suatu unsur yang berbentuk logam. Logam ini memiliki sifat kimia yang dapat larut oleh asam pekat dan tidak dapat larut di dalam air. Secara komersial berbentuk serbuk putih. Salah satu senyawa yang dapat dihasilkan dari logam ini adalah senyawa  $\text{TiO}_2$ . Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) adalah salah satu bahan yang paling sering digunakan secara umum sebagai bahan fotokatalitik yang sangat baik untuk aplikasi lingkungan karena stabil terhadap fotokorosi, stabilitas kimia, tidak beracun dan berbiaya rendah [5]. Titanium dioksida memiliki tiga fase yaitu rutil, anatase, dan brookit. Nilai Energi Gap  $\text{TiO}_2$  yaitu sebesar 3,1 eV untuk rutil dan 3,3 eV untuk anatase [6]. Suhu kalsinasi yang lebih tinggi akan mempengaruhi hasil kristal yang terbentuk selain itu proses kalsinasi akan menyebabkan pertumbuhan kristal maupun transformasi fasa, dengan meningkatnya suhu kalsinasi derajat kristalinitas juga meningkat [7], kalsinasi dilakukan untuk mengaktifkan sifat fotokatalik  $\text{TiO}_2$  dan diketahui bahwa anatase merupakan fase  $\text{TiO}_2$  yang memiliki sifat fotokatalik lebih baik dalam proses fotokatalis. Suhu kalsinasi juga

mampu menyebabkan perubahan energi celah pita pada fotokatalis yang dihasilkan. Meningkatnya suhu kalsinasi menyebabkan bertambahnya diameter pori dan ukuran distribusi pori lebih luas.

Kelemahan TiO<sub>2</sub> yaitu efisiensi menurun akibat rekombinasi yang cepat dan kesulitan dalam pemisahan dari larutan juga menjadi alasan utama terbatasnya penerapan TiO<sub>2</sub> [8]. Mengatasi kelemahan dari TiO<sub>2</sub> diperlukan pendopongan dan penggabungan dengan material magnetik. Kobalt merupakan salah satu logam yang sering digunakan sebagai dopan untuk memodifikasi fotokatalis TiO<sub>2</sub>, adanya dopan Co pada TiO<sub>2</sub> menyebabkan TiO<sub>2</sub> mempunyai konduktivitas tipe p. Ion kobalt bertindak sebagai pemulung atau penangkap elektron. Efek doping Co dapat menurunkan energi celah pita (E<sub>g</sub>) [9]. Doping dengan kobalt (Co) secara khusus dipilih dibandingkan logam transisi lainnya karena keselarasan tingkat energinya yang menguntungkan TiO<sub>2</sub>. Penyelarasan ini memungkinkan transfer dan pengurangan muatan secara efisien rekombinasi muatan yang pada akhirnya meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Bahan magnetik (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) merupakan salah satu solusi untuk proses daur ulang yang sederhana sehingga TiO<sub>2</sub> akan lebih mudah dipisahkan dari larutan dan mencegah aglomerisasi [10]. Penggabungan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> juga dapat menyebabkan perubahan sifat kemagnetan dapat digunakan kembali karena sifat magnetiknya [11] dan sekaligus mempersempit energi celah pita TiO<sub>2</sub>.

Studi yang dilakukan [12] membahas tentang sintesis dan karakterisasi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>-Co sebagai fotokatalis magnetik dengan preparasi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menggunakan metode kopresipitasi dan sonikasi, dilanjutkan dengan preparasi TiO<sub>2</sub>-Co menggunakan metode sol-gel kemudian dicampurkan keduanya dengan perbandingan antara Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan TiO<sub>2</sub> sebesar 1:3, 1:9, dan 1:15 dengan nama sampel (FT3, FT9, FT15). Kemampuan fotokatalitik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>-Co dalam zat warna *Methylene Blue* berlangsung lebih baik pada FT3 dengan hasil degradasi sebesar pada paparan visibel 32,58% dan 21,97% pada paparan UV.

Menurut penelitian [13] yang mengenai pengaruh berbagai suhu kalsinasi (300–1000 °C) terhadap fase struktural dan karakteristik optik, dielektrik, dan fotodegradasi nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang didoping kobalt (Co). Penelitian ini menggunakan metode kopresipitasi didapati pembentukan fase anatase tetragonal untuk sampel yang dikalsinasi pada suhu 300–600 °C, sedangkan sampel yang dikalsinasi pada suhu 800 dan 1000 °C menunjukkan fase rutil tetragonal. Doping pada matriks dapat menurunkan celah pita energi dibandingkan pada matriks tanpa doping.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh suhu kalsinasi terhadap karakteristik nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>-Co untuk mendegradasi *methylene blue* dengan berdasarkan pengujian yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM), *X-ray diffractometer* (XRD), dan Spektrofotometer UV-Vis.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ini menggunakan kopresipitasi juga melakukan pendekatan secara kuantitatif. Nanopartikel disintesis dengan mencampurkan material magnetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dengan TiO<sub>2</sub> yang telah didoping dengan kobalt (Co). Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli-Agustus Tahun 2024. Proses pembuatan nanopartikel 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 yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat-alat gelas, spatula, neraca analitik, *magnetic stirrer*, botol semprot, cawan krusibel, kertas saring *whatman*, *furnace*, magnet. Sedangkan bahan yang digunakan Titanium (IV) Oxide Merck 97%, Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97%, kobalt *powder*, *methylene blue* (C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>N<sub>3</sub>SCI), ethanol, aquabides.

Tahap pembuatan nanopartikel dengan menyiapkan bahan yang diperlukan yaitu Titanium (IV) Oxide Merck 97%, Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97%, kobalt *powder*, aquabides. Dilakukan pembuatan sampel nanopartikel mula-mula bahan Titanium (IV) Oxide Merck 97% dicampur

dengan kobalt *powder* 10% digerus selama 1 jam lalu dimasukkan ke dalam Aquabides, kemudian *stirrer* menggunakan *magnetic stirrer* selama 90 menit suhu 60 °C kemudian dipisahkan dengan magnet dan dicuci dengan ethanol 100 mL dan aquabides 100 mL dan dioven pada suhu 100 °C selama 2 jam kemudian digerus selama 1 jam. Selanjutnya penggabungan TiO<sub>2</sub>-Co dengan material magnetik (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) digabungkan berdasarkan komposisi 2:1 antara serbuk TiO<sub>2</sub>-Co yang sudah dihasilkan dengan Iron (III) Oxide Sigma Aldrich 97% ke dalam aquabides, kemudian *stirrer* menggunakan *magnetic stirrer* selama 90 menit suhu 60 °C kemudian dipisahkan dengan magnet dan dicuci dengan ethanol dan aquabides, dioven selama 2 jam suhu 100 °C kemudian dikalsinasi menggunakan variasi suhu 400, 500 dan 600 °C selama 3 jam.

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

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

SEM merupakan alat yang digunakan untuk untuk mengetahui morfologi dan analisis permukaan material/bahan. Karakterisasi bahan menggunakan SEM dimanfaatkan untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran butiran, cacat struktural, dan komposisi pencemaran suatu bahan. Kelebihan SEM adalah memiliki resolusi lebih tinggi dari mikroskop optik. Hal ini disebabkan oleh panjang gelombang *de Broglie* lebih pendek dari gelombang optik. Semakin kecil panjang gelombang yang digunakan maka semakin tinggi resolusi yang dihasilkan oleh mikroskop. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini dapat dilihat secara langsung pada hasil SEM yang menyajikan bentuk tiga dimensi berupa gambar atau foto [14]. Mikroskop ini dapat diperbesar sekitar 1.000 sampai 40.000 kali. Hasil SEM yang berupa gambar morfologi menyajikan bentuk permukaan bahan.



Gambar 1 Alat SEM

### 2. *X-ray diffractometer* (XRD)

XRD merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui ukuran kristal dari Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>-Co. Ukuran kristal rata-rata dapat dihitung dengan pelebaran puncak difraksi menggunakan persamaan *Scherrer* [15] yang dapat dilihat sebagai berikut:

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

Keterangan:

- D = Ukuran kristal (nm)
- K = Konstanta kristal (0,94)
- λ = Panjang gelombang (1,54 Å)

$$\beta = \text{FWHM}$$

$$\theta = \text{Sudut puncak (}^\circ\text{)}$$

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



Gambar 2 Alat XRD

### 3. Spektrofotometer UV-Vis

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

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

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



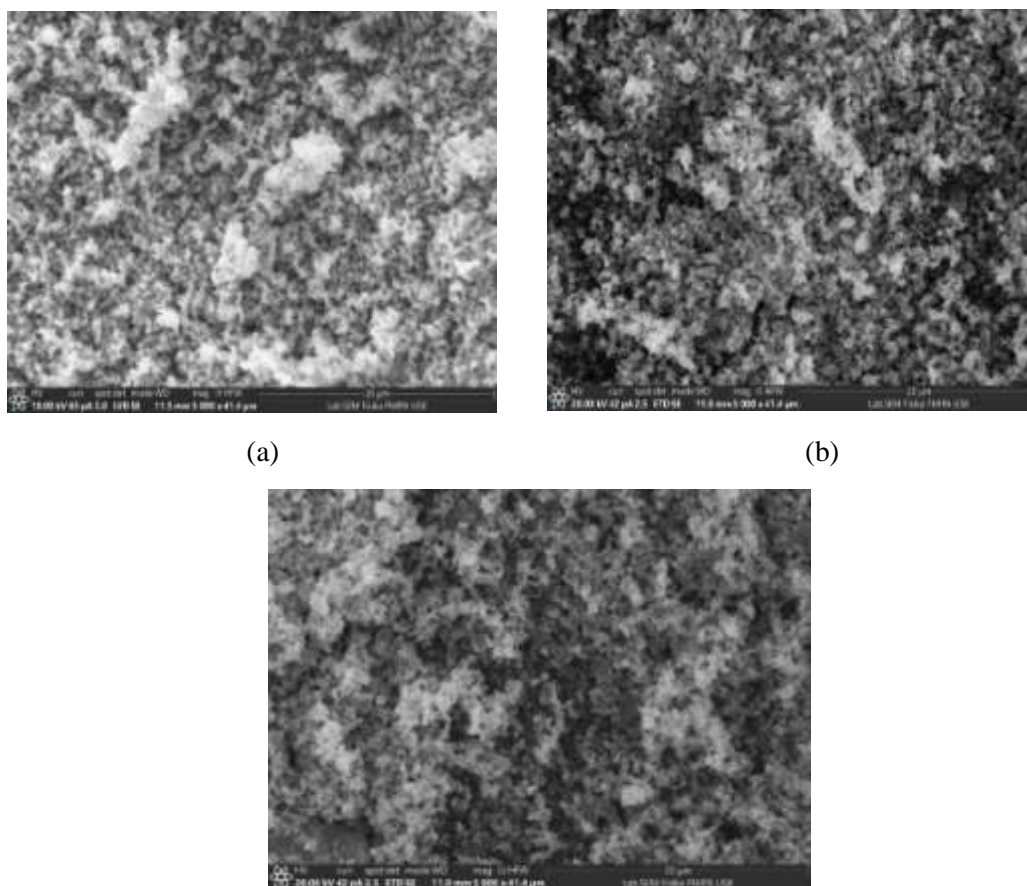
Gambar 3 Alat UV-Vis

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis material fotokatalis dengan bahan  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$  menggunakan metode kopresipitasi dengan perbandingan komposisi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  kemudian dicampur dengan  $\text{TiO}_2\text{-Co}$  sebanyak 1:2. Sampel yang sudah dicampur kemudian dikalsinasi menggunakan variasi suhu 400 °C (FTC400), 500 °C (FTC500), dan 600 °C (FTC600). Hasil karakterisasi menggunakan SEM, XRD dan UV-Vis dijelaskan sebagai berikut:

## 1. SEM

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



Gambar 4 SEM perbesaran 5000 kali (a) FTC400, (b) FTC500, dan (c) FTC600

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa ketiga sampel memiliki morfologi yang berbeda. Pada sampel (a) FTC400, aglomerisasi tampak cukup jelas, dengan struktur permukaan menunjukkan partikel-partikel yang saling menempel dan membentuk partikel lebih besar. Ini menunjukkan bahwa pada suhu kalsinasi 400 °C, pemecahan partikel belum terjadi secara optimal, sehingga material masih cenderung menggumpal. Pada sampel (b) FTC500 meskipun aglomerisasi masih terlihat, tingkat aglomerisasi lebih rendah dibandingkan FTC400. Peningkatan suhu kalsinasi menyebabkan partikel-partikel menjadi lebih tersebar, meskipun beberapa partikel masih tampak menempel satu sama lain. Pada sampel (c) FTC600, aglomerisasi tampak berkurang dengan struktur partikel yang lebih halus dan distribusi yang lebih merata, sehingga partikel-partikel kecil menyatu dan membentuk permukaan yang lebih padat dan seragam.

## 2. 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 (rad)	D (nm)
FTC400	0,2785	30,53
FTC500	0,2821	30,13
FTC600	0,2956	28,74

Berdasarkan Tabel 1 ukuran kristal yang dihitung untuk sampel FTC400, FTC500, dan FTC600 masing-masing adalah 30,53 nm, 30,13 nm, dan 28,74 nm. Ini menunjukkan bahwa sampel FTC400 memiliki ukuran kristal yang lebih besar dibandingkan dengan FTC500 dan FTC600, meskipun perbedaan ukuran kristal di antara ketiga sampel tidak terlalu signifikan. Suhu kalsinasi mempengaruhi ukuran kristal, dimana peningkatan suhu kalsinasi menyebabkan ukuran kristal menurun. Pada kristal dengan ukuran yang lebih besar, atom-atom tersusun lebih teratur, karena kristal berkembang dengan jumlah cacat yang lebih sedikit. Semakin besar ukuran kristal, semakin teratur pula susunan atom di dalamnya. Hal ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa peningkatan suhu kalsinasi akan menghasilkan ukuran kristal yang lebih kecil, karena pada suhu yang lebih tinggi, atom-atom dalam senyawa  $\text{TiO}_2$  berdifusi lebih cepat (Ilmi, 2020).

### 3. 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	Absorbansi UV-Vis 663 (nm) <i>methylene blue</i>	Absorbansi UV-Vis 663 (nm) sampel	Degradasi (%)
FTC400	2,029	0,084	95,86
FTC500	2,029	0,038	98,12
FTC600	2,029	0,012	99,40



Gambar 5 Fotodegradasi *methylene blue* dengan katalis  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa suhu kalsinasi memengaruhi efisiensi katalis dalam mendegradasi zat warna *methylene blue*. Perbedaan disetiap botol FTC400, FTC500, dan FTC600 dapat diamati bahwa semakin tinggi suhu kalsinasi maka struktur dan aktivitas katalis dapat berubah, yang berpotensi meningkatkan persentase degradasi. Besar nilai persentase degradasi pada sampel FTC400, FTC500, dan FTC600 masing-masing adalah sebesar 95,86%, 98,12%, dan 99,40%.

### KESIMPULAN

Pengaruh suhu kalsinasi terhadap nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$  terlihat dari hasil uji hasil uji SEM, dimana aglomerisasi tampak berkurang seiring dengan peningkatan suhu kalsinasi hal ini diperkuat oleh hasil pengujian XRD yang menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu kalsinasi ukuran kristal semakin kecil, untuk sampel FTC400, FTC500, dan FTC600 masing-masing ukuran kristal adalah 30,53 nm, 30,13 nm, dan 28,74 nm. Selain itu, pengujian menggunakan UV-VIS menunjukkan bahwa persentase degradasi sampel meningkat seiring dengan semakin tingginya suhu kalsinasi, pada sampel FTC600 memiliki persentase degradasi paling tinggi yaitu 99,40%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. O. Oladoye, T. O. Ajiboye, E. O. Omotola, dan O. J. Oyewola, "Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater," *Results in Engineering*, vol. 16, hlm. 100678, Des 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100678.
- [2] M. A. Al-Nuaim, A. A. Alwasiti, dan Z. Y. Shnain, "The photocatalytic process in the treatment of polluted water," 1 Februari 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s11696-022-02468-7.
- [3] M. B. Tahir, M. Rafique, M. S. Rafique, N. Fatima, dan Z. Israr, "Metal oxide- and metal sulfide-based nanomaterials as photocatalysts," dalam *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, Elsevier, 2020, hlm. 77–96. doi: 10.1016/b978-0-12-821192-2.00006-1.
- [4] Pindobilowo, Dwi Ariani, dan Dewi Puspitasari, "Use of Nanoparticles as Materials to Prevent Dental and Oral Diseases," *Formosa Journal of Applied Sciences*, vol. 3, no. 4, hlm. 2123–2134, Apr 2024, doi: 10.55927/fjas.v3i4.8795.
- [5] R. Hatefi, H. Younesi, A. Mashinchian-Moradi, dan S. Nojavan, "A facile decoration of anatase  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  nanocomposite with graphene quantum dots: Synthesis, characterization, and photocatalytic activity," *Advanced Powder Technology*, vol. 32, no. 7, hlm. 2410–2422, Jul 2021, doi: 10.1016/j.appt.2021.05.020.
- [6] A. D. Racovita, "Titanium Dioxide: Structure, Impact, and Toxicity," 1 Mei 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/ijerph19095681.
- [7] N. C. Horti, M. D. Kamatagi, N. R. Patil, S. K. Nataraj, M. S. Sannaikar, dan S. R. Inamdar, "Synthesis and photoluminescence properties of titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ ) nanoparticles: Effect of calcination temperature," *Optik (Stuttg)*, vol. 194, Okt 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.163070.
- [8] S. Khammar, N. Bahramifar, dan H. Younesi, "Preparation and surface engineering of CM- $\beta$ -CD functionalized  $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{TiO}_2$  nanoparticles for photocatalytic degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) from transformer oil," *J Hazard Mater*, vol. 394, Jul 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122422.
- [9] E. Sri Kunarti, I. Kartini, A. Syoufian, dan K. M. Widyandari, "Synthesis and photoactivity of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$  as a magnetically separable visible light responsive photocatalyst," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 18, no. 3, hlm. 403–410, Agu 2018, doi: 10.22146/ijc.26831.
- [10] A. H. Kianfar dan M. A. Arayesh, "Synthesis, characterization and investigation of photocatalytic and catalytic applications of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{CuO}$  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.
- [11] A. N. Chishti *dkk.*, "Synthesis of silver doped  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$  nanoparticles and its catalytic activities for the degradation and reduction of methylene blue and 4-nitrophenol," *Appl Surf Sci*, vol. 546, Apr 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.149070.
- [12] M. Ramadhan, A. R. Pradipta, dan E. S. Kunarti, "Synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2\text{-Co}$  nanocomposite as model of photocatalyst with magnetic properties," dalam *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2017, hlm. 14–19. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.901.14.
- [13] K. Safeen *dkk.*, "Structure phase-dependent dielectric and photodegradation properties of Co-doped  $\text{TiO}_2$  nanoparticles synthesized via co-precipitation route," *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 27, no. 5, Sep 2023, doi: 10.1016/j.jscs.2023.101711.
- [14] S. Khoirunisa' dan D. Ariswan, "STRUKTUR DAN KOMPOSISI KIMIA BAHAN SEMIKONDUKTOR LAPISAN TIPIS Sn(S 0,8 Te 0,2 ) HASIL PREPARASI DENGAN TEKNIK EVAPORASI VAKUM." *Jurnal Ilmu Fisika dan Terapannya*, 2017, Vol. 6, no. 3, hlm. 173-183, doi: 10.21831/fisika%20-%20s1.v6i3.7465.
- [15] N. F. R. Tang, D. Tahir, dan H. Heryanto, "Sintesis Komposit  $\text{ZnO}/\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  menggunakan metode Sol-gel sebagai Material Fotokatalis Limbah Cair Industri (Melen Biru)," *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, vol. 19, no. 1, hlm. 31, Mar 2022, doi: 10.20527/flux.v19i1.11824.