

## Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Morfologi Dan Bandgap Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ Dengan Metode Kopresipitasi

Ahya Zaelani<sup>(1,a)\*</sup>, Ridwan Yusuf Lubis<sup>(1,b)</sup>, Miftahul Husnah<sup>(2,c)</sup> Ali  
Affan Silalahi<sup>(3,d)</sup>

<sup>(1),(2)</sup>Jurusan Fisika, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Deli Serdang, Indonesia, 20353

<sup>(3)</sup>Jurusan Farmasi, Universitas Haji Sumatera Utara, Kota Medan, Indonesia, 20226

Email : <sup>(a\*)</sup>ahyazaelani86@gmail.com, <sup>(b)</sup>ridwanyusuflubis@uinsu.ac.id,

<sup>(c)</sup>miftahulhusnah@uinsu.ac.id, <sup>(d)</sup>aliaffansilalahi@gmail.com

Diterima (09 November 2025), Direvisi (16 Januari 2026)

**Abstract.**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ , and  $\text{SiO}_2$  nanocomposite materials have been extensively investigated for their potential in various physical and environmental applications, particularly in the photocatalytic degradation of textile wastewater containing toxic organic dyes such as Methylene Blue (MB). This study aims to determine the effect of sintering temperature on the morphology and bandgap energy of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  nanocomposites synthesized using the coprecipitation method. The synthesized samples were subjected to sintering at temperatures of 500 °C, 550 °C, and 600 °C. Characterization was performed using Scanning Electron Microscopy (SEM) to observe morphological changes and Ultraviolet–Visible (UV–Vis) spectrophotometry to determine the bandgap energy. The SEM results revealed that higher sintering temperatures led to increased agglomeration and grain size, with the dominant particle size ranging between 0.22  $\mu\text{m}$  and 0.24  $\mu\text{m}$ . Furthermore, an increase in grain size correlated with a slight rise in bandgap energy from 2.35 eV to 2.37 eV, attributed to the widening separation between the valence and conduction bands. Among all samples, the FST500 nanocomposite (sintered at 500 °C) exhibited the most optimal properties, characterized by smaller agglomeration, finer grain size, and lower bandgap energy. These findings demonstrate that sintering temperature plays a crucial role in controlling the structural and optical properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  nanocomposites for potential photocatalytic applications in wastewater treatment.

**Keywords:**  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ , Coprecipitation, Sintering Temperature, Morphology, Bandgap Energy

**Abstrak.** Material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ , dan  $\text{SiO}_2$  telah banyak diteliti karena potensinya dalam berbagai aplikasi fisika dan lingkungan, terutama dalam proses fotokatalitik untuk degradasi limbah cair industri tekstil yang mengandung zat warna organik beracun seperti Methylene Blue (MB). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu sintering terhadap morfologi dan energi bandgap dari material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Sampel hasil sintesis disintering pada suhu 500 °C, 550 °C, dan 600 °C. Karakterisasi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengamati perubahan morfologi dan spektrofotometer Ultraviolet–Visible (UV–Vis) untuk menentukan nilai energi bandgap. Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa peningkatan suhu sintering menyebabkan meningkatnya aglomerasi dan ukuran butir, dengan ukuran partikel dominan berada pada rentang 0,22  $\mu\text{m}$  hingga 0,24  $\mu\text{m}$ . Selain itu, peningkatan ukuran butir berhubungan dengan kenaikan nilai energi bandgap dari 2,35 eV menjadi 2,37 eV, yang disebabkan oleh pelebaran jarak antara pita valensi dan pita konduksi. Di antara seluruh sampel, material nanokomposit FST500 (suhu sintering 500 °C) menunjukkan karakteristik paling optimal dengan aglomerasi lebih kecil, ukuran butir lebih halus, dan nilai energi bandgap yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa suhu sintering memiliki peran penting dalam mengontrol sifat struktural dan optik material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  untuk aplikasi fotokatalitik pada pengolahan limbah cair.

**Kata kunci:**  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ , Kopresipitasi, Suhu Sintering, Morfologi, Energi Bandgap

---

## PENDAHULUAN

Komposit berbasis oksida besi magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) yang dikombinasikan dengan lapisan silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan titania ( $\text{TiO}_2$ ) telah menarik perhatian para peneliti dalam upaya untuk mengembangkan material nanokomposit yang efektif untuk aplikasi adsorpsi magnetik dan degradasi polutan organik [1]. Namun, proses sintering atau perlakuan panas pada suhu tinggi setelah kopresipitasi dapat memengaruhi ukuran kristal, fase kristal, morfologi partikel dan kinerja nanoskalanya [2], [3]. Pada penelitian material keramik menunjukkan bahwa, suhu sintering meningkatkan ukuran butir, mengurangi porositas, dan meningkatkan densifikasi [4]. Nanokomposit memiliki keunggulan dalam menggabungkan sifat magnetik ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), perlindungan dengan penggunaan lapisan  $\text{SiO}_2$ , dan kemampuan dari  $\text{TiO}_2$  dalam mendegradasi polutan organik [5]. Pengendapan langsung  $\text{TiO}_2$  ke partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  menyebabkan rekombinasi lubang elektron, yang membuat  $\text{SiO}_2$  dianggap sebagai lapisan pelindung karena stabilitas kimia dan termalnya. Masuknya  $\text{SiO}_2$  juga membantu pengendapan  $\text{TiO}_2$  [6].

Perusahaan industri seperti kertas, cat, kosmetik, dan tekstil merusak sumber daya air alami. Bakteri dan senyawa organik seperti pewarna, lapisan api, dan bau busuk adalah komponen limbah industri yang paling umum [7]. Salah satu zat warna yang digunakan dalam industri adalah *Methylene Blue* (MB) [8]. Dikarenakan pewarna *Methylene Blue* (MB) sangat larut dalam air, air limbah yang mengandung pewarna ini mengalir ke sungai dan aliran alami lainnya, yang menyebabkan masalah besar bagi lingkungan. Oleh karena itu, penghilangan atau degradasi *Methylene Blue* (MB) merupakan bagian penting dari pengolahan air limbah [9], [10], [11].

Untuk menghilangkan *Methylene Blue* (MB), fotodegradasi telah terbukti dapat digunakan secara efektif. Namun, polutan organik dalam larutan air dapat terurai dengan sendirinya karena mereka tidak dapat menyerap energi matahari secara langsung.  $\text{TiO}_2$  menarik perhatian karena murah, tidak beracun, stabil, dan memiliki aktivitas tinggi. Oleh karena itu, untuk mengatasi kekurangan  $\text{TiO}_2$  dan meningkatkan fotoaktivitasnya, berbagai pendekatan telah dikembangkan. Salah satu pendekatan yang menarik adalah menggunakan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  [12], [13].

Studi terdahulu telah menunjukkan bahwa lapisan  $\text{SiO}_2$  antara  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{TiO}_2$  dapat meningkatkan stabilitas termal dan kimia serta mengurangi reaksi yang tidak diinginkan antara magnetit dan titania. Ini memberikan kemungkinan kinerja yang lebih baik [14]. Karena itulah, penelitian dengan fokus khusus pada suhu sintering dan pengaruhnya pada sistem  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  yang disintesis melalui metode kopresipitasi adalah sangat relevan dan memberikan kontribusi ilmiah untuk optimasi material nanokomposit fungsional. Dalam banyak penelitian, variasi suhu sintering pasca-kopresipitasi telah terbukti mengubah fase anatase ke rutile (untuk  $\text{TiO}_2$ ), memperbesar ukuran kristalit [15], [16]. Penggunaan suhu sintering yang tidak tepat dapat menyebabkan penurunan kualitas material nanokomposit fotokatalis seperti struktur, morfologi, luas permukaan, porositas dan efisiensi pemisahan muatan yang memberikan dampak terhadap kemampuan fotodegradasinya [17]. Oleh karena itu, dalam konteks nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  yang disintesis melalui metode kopresipitasi, sangat penting untuk mengeksplorasi pengaruh langsung dari variasi suhu sintering terhadap karakteristik

fisiknya dan kemampuannya terhadap degradasi *Methylene Blue* (MB) [18], [19].

Berdasarkan uraian di atas, penulis melakukan penelitian pengaruh suhu sintering terhadap karakteristik nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  untuk degradasi *Methylene Blue* (MB). Dengan karakterisasi dalam penelitian ini meliputi pengujian yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spektrophotometer*.

### **.METODE PENELITIAN**

Material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  disintesis menggunakan metode kopresipitasi dengan mencampurkan serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sebagai basis dari nanokomposit kemudian dilapisi dengan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ . Hasil endapan dari campuran nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  kemudian dikeringkan dan dianalisa menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spectroscopy*.

#### **Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$**

Serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sebanyak 3 gram dilarutkan kedalam akuabides dengan volume 50 ml kemudian diaduk menggunakan *hotplate magnetic stirrer* selama 60 menit pada suhu 30 °C.  $\text{NH}_4\text{OH}$  sebanyak 6 ml dilarutkan kedalam akuabides dengan volume 50 ml, kemudian larutan hasil campurannya dituangkan kedalam larutan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Selanjutnya, larutan hasil campuran  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{NH}_4\text{OH}$  ditambahkan larutan TEOS sebanyak 120 ml kemudian diaduk menggunakan *hotplate magnetic stirrer* selama 3 jam pada suhu ruang. Hasil campurannya kemudian diendapkan selama 1 malam dalam ruang gelap kemudian dipisahkan menggunakan bantuan magnet eksternal. Hasil endapan  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  selanjutnya dicuci sebanyak tiga kali masing-masing dengan akuabides dan etanol. Serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  dikeringkan menggunakan oven selama 2 jam pada suhu

100 °C kemudian dilakukan penggerusan selama 1 jam.

#### **Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$**

TTIP sebanyak 4 ml dicampurkan dengan 5 gram serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  kemudian diaduk menggunakan *hotplate magnetic stirrer* selama 30 menit pada suhu 35 °C. Selanjutnya, ditambahkan  $\text{HNO}_3$  sebanyak 2 tetes menggunakan pipete tetes pasteur dan diaduk selama 8 jam pada suhu 70 °C. Endapan  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  yang terbentuk pada dasar beaker gelas kemudian dipisahkan menggunakan magnet eksternal. Serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dicuci menggunakan akuadest dan etanol kemudian dikeringkan kedalam oven dengan suhu 60 °C selama 8 jam. Serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  yang sudah kering kemudian digerus selama 1 jam dan disintering dengan variasi suhu 500 °C, 550 °C dan 600 °C. Sampel material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  yang sudah disintering selanjutnya dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spektrophotometer*.

#### **Analisa Hasil Data *Scanning Electron Microscope* (SEM)**

Karakterisasi *Scanning Electron Microscope* (SEM) digunakan untuk mengetahui morfologi dan ukuran butir dari partikel nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dengan perbesaran 20.000 kali. Data yang diperoleh berupa gambar topografi yang dihasilkan dari sampel yang disinari dengan energi tinggi elektron yang mengenai permukaan sampel. Analisa hasil karakterisasi SEM menggunakan software *Digimizer* untuk mengetahui sebaran dan distribusi dari butiran serbuk material  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ .

#### **Analisa Hasil Data *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spektrophotometer***

*Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spektrophotometer* merupakan alat karakterisasi

yang digunakan untuk mengetahui kemampuan absorpsi cahaya suatu material dalam rentang cahaya tampak berkisar 500 – 900 nm. Pada proses karakterisasi ini menggunakan mesin Shimadzu UV-1900 dan larutan *Methylene Blue* (MB) 10 ppm dengan panjang gelombang 663 nm. Larutan *Methylene Blue* (MB) 10 ppm diperoleh dari larutan *Methylene Blue* (MB) 1000 ppm dengan menggunakan persamaan 1.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (1)$$

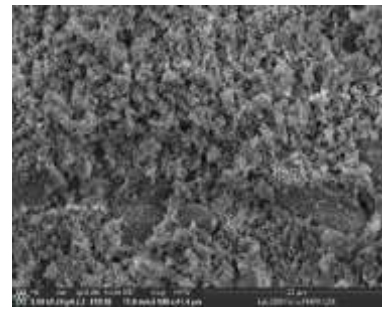
dimana  $C_1$  = konsentrasi larutan awal (ppm),  $V_1$  = volume larutan awal (ml),  $C_2$  = konsentrasi larutan akhir yang diinginkan (ppm) dan  $V_2$  = volume larutan akhir yang diinginkan (ml).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

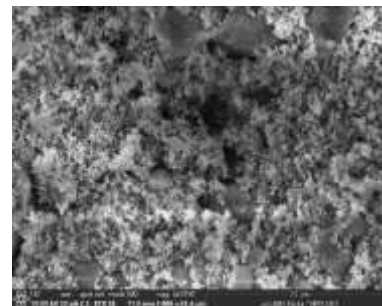
Hasil karakterisasi sampel nanokomposit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dengan variasi suhu sintering 500 °C (FST500) , 550 °C (FST550) dan 600 °C (FST600) menggunakan *Scanning Electron Micro-scope* (SEM) dan *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spektro-photometer* untuk mengetahui morfologi, ukuran partikel, bandgap dan kemampuan degradasinya dapat dilihat pada pembahasan berikut ini.

### Analisa Hasil Pengujian Karakterisasi *Scanning Electron Microscope* (SEM)

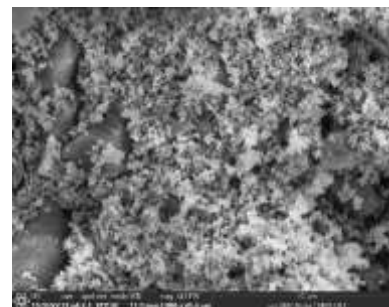
Berdasarkan hasil karakterisasi SEM terhadap material nanokomposit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dengan perbesaran 5.000 kali diperoleh data seperti pada Gambar 1.



(a)



(b)

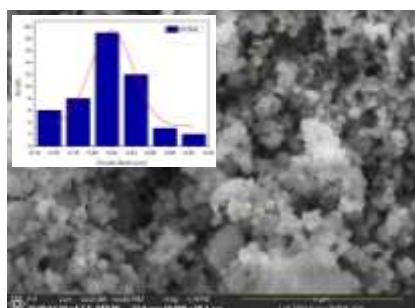


(c)

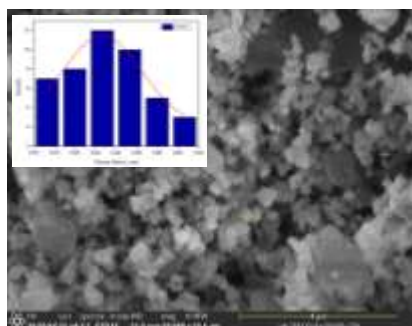
Gambar 1. SEM Perbesaran 5.000 kali (a) FST500, (b) FST550, dan (c) FST600

Hasil karakterisasi sampel nanokomposit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> menggunakan SEM dengan perbesaran 5000 kali pada Gambar 1. menunjukkan perbedaan morfologi antara FST500, FST550 dan FST600. Pada sampel FST600 terdapat lebih banyak aglomerasi yang ditandai dengan banyaknya gumpalan – gumpalan partikel dibandingkan dengan dua variasi lainnya yang dipengaruhi oleh kenaikan suhu sintering. Hal ini sejalan dengan Akter dkk.,

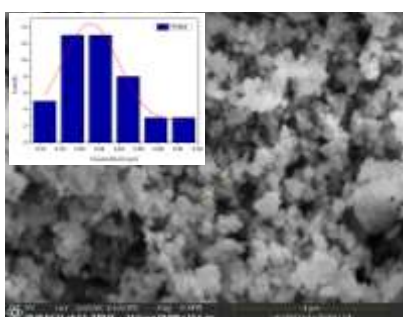
2024 yang menyatakan bahwa suhu tinggi setelah kopresipitasi dapat mempengaruhi ukuran partikelnya. Huang dkk., 2025 menyatakan bahwa kenaikan suhu sintering dapat menyebabkan pertumbuhan butir yang lebih besar, penurunan porositas dan densifikasi lebih tinggi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2. SEM Perbesaran 20.000 kali dan distribusi ukuran butir sampel (a) FST500, (b) FST550, dan (c) FST600

Distribusi ukuran sampel pada sampel material  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  berada pada

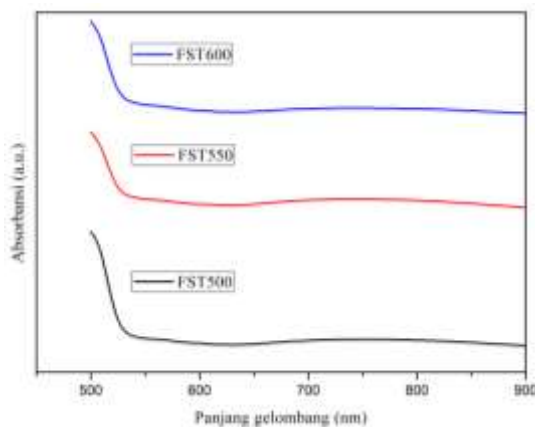
rentang 0,14 – 0,32  $\mu\text{m}$  dengan butiran paling banyak terdapat pada rentang 0,22 – 0,24  $\mu\text{m}$  pada semua variasi sampel. Pengaruh suhu sintering 500 °C, 550 °C dan 600 °C tidak memberikan perbedaan yang signifikan pada ukuran butir. Peningkatan suhu sintering memberikan efek peregeseran kurva distribusi kesebelah kanan ( menjadi didominasi ukuran yang lebih besar ( $> 0,20 \mu\text{m}$ ) yang disebabkan mobilitas atom lebih tinggi dan memungkinkan partikel kecil lebih cepat bergabung menjadi butir yang lebih besar [20]. Senyawa  $\text{TiO}_2$  yang terdapat pada material nanokomposit meningkatkan ukuran butir dan menurunkan luas permukaan karena pengaruh dari peningkatan suhu sintering sehingga dapat memberikan penurunan dalam performa fotokatalisnya [20], [21] Pada penelitian Langa dkk, 2023 juga menyebutkan bahwa peningkatan suhu mengakibatkan meningkatnya derajat kristalinitas yang memberikan pengaruh pada penurunan luas permukaan [22].

Nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  secara visual pada pengujian SEM dapat dilihat secara umum memiliki partikel butir dan morfologi yang memiliki pori serta terjadi aglomerasi pada suhu yang lebih tinggi.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  sebagai basis material yang dilapisi oleh  $\text{SiO}_2$  untuk menghindari kontak langsung dengan air sehingga sifat fotokrosinya menurun sehingga material dapat digunakan lebih lama tanpa sifat racun.  $\text{TiO}_2$  sebagai lapisan terluar yang berfungsi untuk meningkatkan kemampuan fotokatalisnya. Hal ini yang menyebabkan senyawa  $\text{TiO}_2$  yang paling mengalami dampak akibat perubahan suhu sintering sehingga terjadi aglomerasi pada suhu yang lebih tinggi seperti yang terlihat pada pengujian SEM. Aglomerasi yang tinggi akan menyebabkan penurunan luas permukaan dan menurunkan kemampuannya dalam mendegradasi dikarenakan berkurangnya jumlah situs aktif yang dapat

berinteraksi dengan molekul *Methylene Blue* (MB).

### Analisa Hasil Pengujian Karakterisasi Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spektrofotometer

Pengujian UV-Vis dilakukan untuk mengidentifikasi nilai bandgap yang memberikan pengaruh terhadap kemampuan material  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dalam mendegradasi *Methylene Blue* (MB). Berdasarkan karakterisasi UV-Vis dapat diperoleh data grafik seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum absorbansi FST500, FST550, dan FST600

Spektrum absorbansi material fotokatalis dari tiga variasi sampel pada rentang panjang gelombang 500 – 900 nm dengan mencampurkan serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  sebanyak 50 mg kedalam 50 ml *Methylene Blue* (MB) dengan konsentrasi 10 ppm. Serbuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  dan larutan *Methylene Blue* (MB) 10 ppm diaduk selama 30 menit kemudian didiamkan dan disinari cahaya matahari selama 8 jam.

Data hasil pengujian UV-Vis kemudian dianalisa menggunakan persamaan dasar Tauc untuk mengetahui nilai energi bandgapnya. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 2 berikut ini.

$$(ahv)^n = A(hv - E_g) \quad (2)$$

Persamaan 2 dimana  $\alpha$  = koefisien serapan optik ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $h\nu$  = energi foton (eV),  $E_g$  = energi bandgap (eV),  $A$  = konstanta proporsionalitas dan  $n$  = jenis transisi elektronik ( $\frac{1}{2}$  untuk transisi langsung dan 2 untuk transisi tidak langsung). Nilai energi foton ( $h\nu$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan 3.

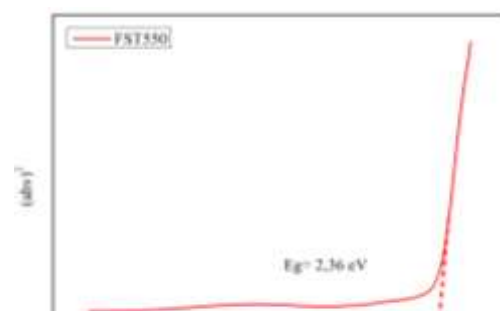
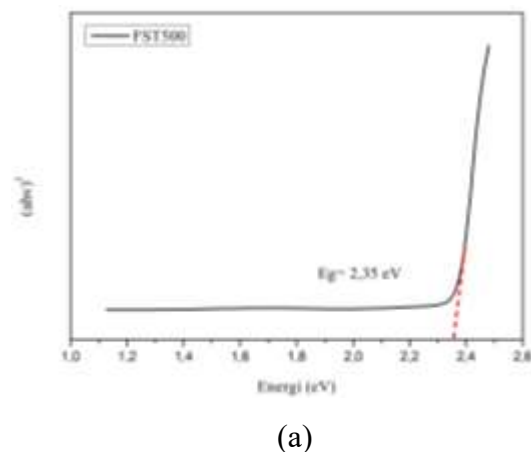
$$h\nu = \frac{1240}{\lambda} \quad (3)$$

dimana  $\lambda$  = panjang gelombang (nm) dan koefisien serapan ( $\alpha$ ) dengan persamaan 4.

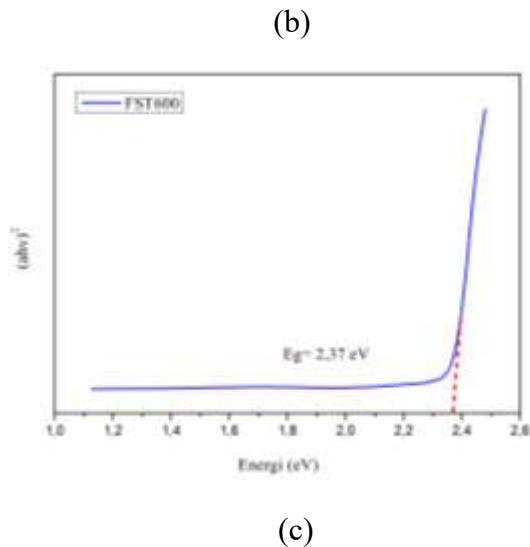
$$\alpha = \frac{2,303A}{t} \quad (4)$$

dimana  $t$  = ketebalan sampel (cm) untuk serbuk padat.

Berdasarkan analisa data pengujian UV-Vis dengan menggunakan persamaan 2, 3 dan 4 maka diperoleh nilai bandgap masing – masing sampel FST500, FST550, dan FST600. Hasil perhitungan tersebut kemudian diplot dalam bentuk kurva baru untuk melihat nilai energi bandgap dengan cara menarik garis lurus gradien grafik terhadap sumbu x (energi bandgapnya). Hasil plot grafik energi *bandgap* dapat dilihat pada Gambar 4 berikut ini.







Gambar 4. Grafik energi *bandgap* hasil analisa data UV-Vis (a) FST500, (b) FST550 dan (c) FST600

Nilai energi bandgap dari sampel nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  yang diperoleh pada Gambar 4. dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Nilai energi *bandgap* FST500, FST550, dan FST600

Sampel	Energi Bandgap (eV)
FST500	2,35
FST550	2,36
FST600	2,37

Nilai energi bandgap mengalami peningkatan dari 2,35 eV – 2,37 eV seiring dengan meningkatnya nilai suhu sintering

yang digunakan. Ukuran partikel yang semakin besar menyebabkan pergeseran pita valensi dan pita konduksi bergeser saling menjauhi sehingga celah antar pita valensi dan pita konduksi material semakin meningkat [23]. Pada pengujian SEM sebelumnya menunjukkan peningkatan ukuran butir ini terjadi karena meningkatnya derajat kristalinitas pada  $\text{TiO}_2$  sehingga terjadi aglomerasi yang lebih banyak yang mengakibatkan material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  mengalami penurunan luas permukaan [21], [22].

Persentasi degradasi material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  terhadap *Methylene Blue* (MB) berdasarkan data UV-Vis dapat dihitung menggunakan persamaan (5) berikut ini.

$$\% \text{Degradasi} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana  $A_0$  = nilai absorbansi *Methylene Blue* awal pada panjang gelombang ( $\lambda$ ) 663 nm dan  $A_t$  = nilai absorbansi setelah diberikan perlakuan dengan mencampurkan material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  kedalam larutan *Methylene Blue* (MB) kemudian disinari dengan sinar Ultraviolet selama 8 jam. Persentasi degradasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai persentasi degradasi FST500, FST550, dan FST600

Sampel	Absorbansi ( $\lambda$ ) 663 nm		Persentasi Degradasi
	MB	Abs	
FST 500	2,029	0,011	99,46%
FST 550	2,029	0,014	99,31%
FST 600	2,029	0,021	98,97%

Kemampuan absorbansi dari material fotokatalis dipengaruhi oleh kombinasi dari bandgap, luas permukaan, porositas, fasa kristal, morfologi dan efisiensi pemisahan muatan [17] Semakin

luas permukaan material nanokomposit dan nilai bandgap yang lebih kecil dapat meningkatkan kemampuan/efisiensi degradasinya terhadap Methylene Blue (MB) [24]. Berdasarkan analisa data SEM dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan luas permukaan karena terjadinya aglomerasi akibat kenaikan suhu sintering sehingga senyawa  $\text{TiO}_2$  pada campuran nanokomposit mengalami fase metastabil sehingga terjadi transformasi kristal yang mengakibatkan partikel menyusun ulang atom dan ion yang menyebabkan ukuran butir menjadi semakin besar dari sebelumnya. Hal ini memberikan pengaruh terhadap nilai bandgap semakin tinggi dan kemampuan degradasinya menurun. Pada Tabel 2. menunjukkan penurunan kemampuan degradasi sampel seiring dengan meningkatnya suhu sintering yang digunakan. Penggunaan suhu sintering  $> 500^\circ\text{C}$  pada proses sintesis material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  tidak direkomendasikan karena dapat menurunkan kemampuan fotodegradasinya.

### KESIMPULAN

Nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  telah berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Pada pengujian SEM dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan aglomerasi pada morfologinya seiring dengan peningkatan suhu sintering. Ukuran butir partikelnya mengalami peningkatan sesuai dengan gambar grafik distribusi butiran SEM yang mengalami pergeseran kesebelah kanan (butiran yang lebih besar). Aglomerasi atau peningkatan ukuran butir ini memberikan pengaruh terhadap meningkatnya nilai energi bandgap material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  karena peningkatan ukuran butir partikel ini menyebabkan pita valensi dan pita konduksi bergeser saling menjauh. Sampel material nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  paling optimal adalah FST500 (suhu sintering  $500^\circ\text{C}$ )

karena aglomerasi dan ukuran butir yang lebih kecil dan nilai bandgap yang lebih kecil. Penggunaan suhu diatas  $500^\circ\text{C}$  kurang direkomendasikan pada sintesis nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  sebagai material fotokatalis.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, terutama dosen program studi Fisika UINSU Medan dan keluarga dalam upaya penyelesaian penelitian dan artikel ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Gunlazuardi, A. Fisli, Ridwan, Y. K. Krisnandi, dan D. Robert, "Magnetically Separable  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  Photocatalyst Composites Prepared through Hetero Agglomeration for the Photocatalytic Degradation of Paraquat," *Makara J Sci*, vol. 25, no. 4, hlm. 236–246, Des 2021, doi: 10.7454/mss.v25i4.1277.
- [2] F. V. Gutierrez dkk., "The effect of temperature on the synthesis of magnetite nanoparticles by the coprecipitation method," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, Feb 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25781.
- [3] T. NIU, W. CHEN, H. CHENG, dan L. WANG, "Grain growth and thermal stability of nanocrystalline Ni– $\text{TiO}_2$  composites," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 27, no. 10, hlm. 2300–2309, Okt 2017, doi: 10.1016/S1003-6326(17)60256-5.
- [4] A. Maou, N. Gouitaa, F. Z. Ahjyaje, T. D. Lamcharfi, F. Abdi, dan N.



- Idrissi Kandri, "Impact of sintering temperature on the structural, morphological, and dielectric properties of  $(1-x)\text{LaFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$  ( $x = 0.49$ )," *Heliyon*, vol. 11, no. 2, Jan 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41798.
- [5] S. Nur'aini, F. S. Arsyad, D. Setyabudidaya, B. Soerya, dan B. R. Lia Sari, "Review Sifat-sifat dan Karakteristik Fotokatalitik  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  Untuk Mengatasi Polusi Air," *Jurnal Penelitian Sains*, vol. 25, no. 2, hlm. 180, 2023, doi: 10.56064/jps.v25i2.849.
- [6] S. K. Kassahun, S. N. Tiruneh, S. A. Mohammed, dan H. Kim, "Core shell  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{N-TiO}_2$  for photodegradation of 4-nitrophenol under sunlight: A machine learning process optimization," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 72, hlm. 107639, Apr 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107639.
- [7] A. Azanaw, B. Birlie, B. Teshome, dan M. Jemberie, "Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 6, hlm. 100230, Des 2022, doi: 10.1016/j.cscee.2022.100230.
- [8] A. B. Aritonang, P. Parwaty, M. A. Wibowo, P. Ardiningsih, dan A. Adhitiyawarman, "Sintesis  $\text{TiO}_2$ -rGO Dengan Pereduksi Alumunium untuk Fotokatalisis Degradasi Metilen Biru dibawah Irradiasi Sinar Tampak," *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, hlm. 150, Jan 2023, doi: 10.20961/equilibrium.v6i2.65518.
- [9] N. Lenni dan R. Yusuf Lubis, "Material Nanopartikel Fotokatalis  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  Untuk Degradasi Methylene Blue," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 8, no. 1, hlm. 59–65, 2025, doi: 10.30596/rmme.v8i1.21752.
- [10] H. Salsabila Lubis, R. Yusuf Lubis, dan A. Halim Daulay, "Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -Co Dengan Variasi Suhu Kalsinasi Dalam Mendegradasi Methylene Blue," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 8, no. 1, hlm. 115–121, 2025, doi: 10.30596/rmme.v8i1.21755.
- [11] D. A. Situmorang, R. Y. Lubis, dan M. Husnah, "Karakterisasi Dan Aktivitas Fotokatalitik Green Synthesized Nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  Menggunakan Ekstrak Daun Kelor Untuk Degradasi Methylene Blue," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 8, no. 1, hlm. 66–73, 2025, doi: 10.30596/rmme.v8i1.21753.
- [12] E. S. Kunarti, A. Syoufian, I. S. Budi, dan A. R. Pradipta, "Preparation and Properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  Core-Shell Nanocomposite as Recoverable Photocatalyst," *Asian Journal of Chemistry*, vol. 28, no. 6, hlm. 1343–1346, 2016, doi: 10.14233/ajchem.2016.19697.

- [13] P. L. Hariani, S. Salni, M. Said, dan R. Farahdiba, "Core-shell Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Magnetic Modified Ag for the Photocatalytic Degradation of Congo Red Dye and Antibacterial Activity," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, vol. 18, no. 2, hlm. 315–330, Agu 2023, doi: 10.9767/bcrec.19275.
- [14] B. R. Liasari, F. S. Arsyad, A. Assaidah, R. Ramlan, S. Nur'aini, dan B. Soerya, "EFFECT OF FE<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SIO<sub>2</sub>/TIO<sub>2</sub> PHOTOCATALYST ON POLLUTANT MANAGEMENT IN SWAMP WATER," *Indonesian Physical Review*, vol. 7, no. 1, hlm. 10–31, Nov 2023, doi: 10.29303/ipr.v7i1.271.
- [15] S. A. Kim, Sk. K. Hussain, M. A. Abbas, dan J. H. Bang, "High-temperature solid-state rutile-to-anatase phase transformation in TiO<sub>2</sub>," *J Solid State Chem*, vol. 315, hlm. 123510, Nov 2022, doi: 10.1016/j.jssc.2022.123510.
- [16] X. Zhu *dkk.*, "The effect of heat treatment on the anatase–rutile phase transformation and photocatalytic activity of Sn-doped TiO<sub>2</sub> nanomaterials," *RSC Adv*, vol. 8, no. 26, hlm. 14249–14257, 2018, doi: 10.1039/C8RA00766G.
- [17] S. M. Tichapondwa, J. P. Newman, dan O. Kubheka, "Effect of TiO<sub>2</sub> phase on the photocatalytic degradation of methylene blue dye," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 118–119, hlm. 102900, Okt 2020, doi: 10.1016/j.pce.2020.102900.
- [18] C. Langa, M. Mathipa, N. Mabuba, dan N. C. Hintsho-Mbita, "Effect of calcination temperature on the structural and photocatalytic properties of nickel sulfide nanoparticles for dye degradation and antibacterial applications," *Chemical Physics Impact*, vol. 11, hlm. 100913, Des 2025, doi: 10.1016/j.chphi.2025.100913.
- [19] B. N. Cardoso *dkk.*, "Tuning Anatase-Rutile Phase Transition Temperature: TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Nanoparticles Applied in Dye-Sensitized Solar Cells," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2019, hlm. 1–9, Mar 2019, doi: 10.1155/2019/7183978.
- [20] S. Phromma, T. Wutikhun, P. Kasamechonchung, T. Eksangsri, dan C. Sapcharoenkun, "Effect of Calcination Temperature on Photocatalytic Activity of Synthesized TiO<sub>2</sub> Nanoparticles via Wet Ball Milling Sol-Gel Method," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, hlm. 993, Feb 2020, doi: 10.3390/app10030993.
- [21] M. G. Kim *dkk.*, "Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles," *ACS Omega*, vol. 6, no. 16, hlm. 10668–10678, Apr 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00043.

- [22] C. Langa, Z. N. Tetana, dan N. C. Hintsho-Mbita, "Effect of calcination temperature on the synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles from *Sutherlandia frutescence* for the degradation of Congo red dye and antibiotics ciproflaxin and sulfamethoxazole," *Chemical Physics Impact*, vol. 7, hlm. 100389, Des 2023, doi: 10.1016/j.chphi.2023.100389.
- [23] B. S. Avinash *dkk.*, "Effect of particle size on band gap and DC electrical conductivity of TiO<sub>2</sub> nanomaterial," 2016, hlm. 020426. doi: 10.1063/1.4946477.
- [24] S. Wardiyati *dkk.*, "Pengaruh Penambahan SiO<sub>2</sub> Terhadap Karakteristik Dan Kinerja Fotokatalitik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> pada Degradasi Methylene Blue," *Jurnal Kimia Kemasan*, vol. 38, no. 01, hlm. 31–40, 2016.

