



Review sifat-sifat dan karakteristik fotokatalitik $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ untuk mengatasi polusi air

SITI NUR'AINI, FITRI SURYANI ARSYAD*, DEDI SETYABUDIDAYA, BALADA SOERYA,
DAN BETA RIANA LIA SARI

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan 30862, Indonesia

<p>Kata kunci: Fe_3O_4, SiO_2, TiO_2, kopresipitasi, hidrotermal</p>	<p>ABSTRAK: Air sebagai sumber kehidupan yang tak ternilai di bumi yang selalu digunakan setiap hari kini dihadapkan pada ancaman serius seperti polusi. Para peneliti dunia sedang mencari solusi inovatif untuk mengatasi masalah ini. Artikel ini menunjukkan tinjauan mengenai berbagai metode sintesis bahan Fe_3O_4, SiO_2, dan TiO_2 yang bertujuan untuk mengatasi polusi air. Dengan penerapan strategi seperti kopresipitasi, sol-gel dan hidrotermal, bahan-bahan tersebut berhasil membentuk nanopartikel berkualitas tinggi dengan ukuran dan distribusi yang dapat dikendalikan. Dari beberapa penelitian dan karakterisasi menunjukkan bahwa kombinasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dapat digunakan sebagai katalis untuk mendegradasi zat polutan dalam air. Adapun beberapa indikator seperti pemilihan pelarut yang tepat, pengaturan suhu, tekanan, dan interval waktu yang cermat, merupakan kunci untuk mencapai langkah signifikan dalam mengatasi polusi air.</p>
<p>Keywords: Fe_3O_4, SiO_2, TiO_2, coprecipitation, hydrothermal</p>	<p>ABSTRACT: Water, as an invaluable source of life on Earth, constantly utilized every day, is now facing a serious threat like pollution. World researchers are actively seeking innovative solutions to tackle this issue. This article presents an overview of various synthesis methods for materials such as Fe_3O_4, SiO_2, and TiO_2, with the aim of addressing water pollution. By implementing strategies like coprecipitation, sol-gel, and hydrothermal techniques, these materials have successfully formed high-quality nanoparticles with controllable sizes and distributions. Several studies and characterizations demonstrate that the combination of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ can be used as a catalyst for degrading pollutants in water. Key factors, such as the appropriate choice of solvents, precise regulation of temperature, pressure, and careful time intervals, are crucial in making significant strides towards overcoming water pollution.</p>

1 PENDAHULUAN

Air adalah salah satu sumber daya alam yang penting untuk berbagai keperluan manusia dan kehidupan ekosistem di sekitarnya [1], diantaranya ialah air rawa. Air rawa adalah area yang terus-menerus atau kadang-kadang tergenang air akibat drainase yang terhambat, dan memiliki karakteristik unik dalam hal fisik, kimia, dan biologi [2]. Namun, kebanyakan wilayah perairan seperti air rawa sering terkontaminasi [3] oleh logam berat seperti besi (Fe) dan tembaga (Cu) [4] [5] yang dapat berasal dari aktivitas industri, pertanian, dan limbah domestik [6]. Kehadiran logam berat dalam air rawa dapat menimbulkan dampak negatif [7] terhadap lingkungan dan kesehatan manusia [8].

Untuk mengatasi masalah pencemaran logam berat dalam air rawa, beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan metode yang efektif dalam menghilangkan logam berat tersebut. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah menggunakan fotokatalisis, di mana bahan fotokatalis seperti titanium dioksida (TiO_2) [9] digunakan untuk mengkatalisis reaksi oksidasi logam berat di bawah paparan cahaya matahari atau cahaya lampu. Namun, efisiensi fotokatalisis TiO_2 terbatas pada sinar ultraviolet (UV), sementara sebagian besar radiasi matahari adalah sinar tampak [10].

Untuk meningkatkan efisiensi fotokatalisis dalam sinar tampak, penelitian telah dilakukan untuk memodifikasi TiO_2 dengan bahan tambahan. Salah satu pendekatan yang menarik adalah menggunakan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ [11]. Nanokomposit

* Corresponding Author: email: fitri_suryani@unsri.ac.id

ini memiliki keunggulan dalam menggabungkan sifat magnetik Fe_3O_4 , perlindungan dari lapisan SiO_2 , dan kemampuan fotokatalitik dari TiO_2 . Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ memiliki potensi dalam fotokatalisis degradasi logam berat [12].

Silika (SiO_2) dan pasir besi Fe_3O_4 dapat diperoleh secara langsung dari sumber alam dengan mudah [9]. Di sisi lain, TiO_2 banyak direkomendasikan sebagai katalis karena memiliki beberapa keunggulan, seperti tidak beracun, sifat kimia yang stabil, biaya yang terjangkau, kemampuan degradasi yang kuat,

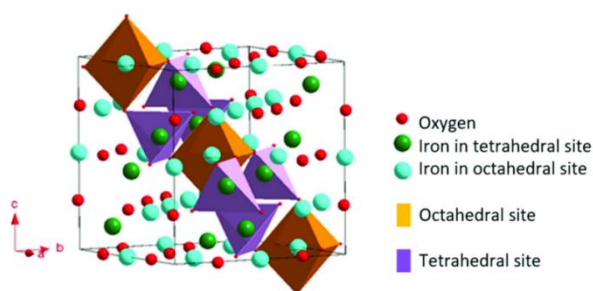
dan celah optik yang lebar [13] [14]. Untuk mempercepat proses dan meningkatkan efisiensi katalis, penambahan bahan magnet pada katalis TiO_2 dapat dilakukan dengan menggunakan pasir besi (Fe_3O_4). Pasir besi memiliki sifat superparamagnetik, yaitu kemampuan untuk menjadi magnetik ketika terkena medan magnet eksternal, dan kehilangan sifat magnetiknya saat medan magnet dihilangkan. Selain itu, Fe_3O_4 mudah terdispersi dalam air dan dapat ditarik kembali menjadi satu dengan bantuan medan magnet eksternal. Dengan mengintegrasikan kedua bahan katalis TiO_2 dengan Fe_3O_4 superparamagnetik, komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ dapat terbentuk [15].

Tabel 1. karakteristik dan parameter untuk adsorpsi beberapa logam berat

Logam Berat	Karakteristik	Material Penyerapan	Parameter penyerapan optimum			Ref
			pH	T(°C)	Q(mg/g)	
Al (III) dan Fe(III)	Dapat timbul dari proses penyaringan gas sebagai hasil dari reaksi. Zat ini memiliki efek toksik dan apabila tertelan dapat menyebabkan penyakit seperti kehilangan nafsu makan, Alzheimer, kejang, gangguan pada hati, dan ginjal.	Kitosan	4.5	25	140.2	[16]
Cu (II) dan Zn (II)	Ion tembaga(II), seng(II), dan kobalt(II) adalah beberapa ion logam berat yang paling umum di industri modern seperti pertambangan, metalurgi, produksi baterai, dan pelapisan logam. Logam-logam berat ini dapat berkembang biak dalam organisme.	Material basah	3.16	Suhu ruang	440 dan 32	[17]
Pb(II) dan Cd (III)	Berasal dari industri, pipa bensin, dan distribusi air, dengan nilai gesekan untuk ion Pb(II) adalah 0,1 mg/L	Karbon aktif	5.5-6	56.8	9.30	[18]
As (III)	Arsenik (As) adalah zat yang sangat beracun di lingkungan perairan. Di dalam air alami, arsenik kebanyakan terdapat dalam dua keadaan oksidasi: As(III) dan As(V). Spesies arsenik yang dominan dalam air tanah adalah As(III)	$\text{Cu}_2\text{FeO}_4/\text{PMS}$	6.7	Suhu ruang	63.9	[19]

2 ANALISIS SIFAT DAN KARAKTERISTIK Fe_3O_4 , SiO_2 DAN TiO_2

Magnetit (Fe_3O_4)



Gambar 1. Gambaran struktur kristalografi magnetit [20].

Magnetit (Fe_3O_4) adalah suatu senyawa alami yang terdiri dari besi dan oksigen, dengan rumus kimia $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, dan memiliki sifat magnetik yang paling kuat dibandingkan dengan besi oksida lainnya [21]. Magnetit memiliki struktur kristal yang disebut spinel terbalik, dengan sel satuan yang berbentuk face center cubic (fcc) [22]. Gambaran struktur kristal dari Fe_3O_4 dapat dilihat dalam Gambar 1.

Dalam susunan anionik, sekitar sepertiga dari 64 situs tetrahedral diisi oleh kation Fe^{3+} trivalen, sedangkan setengah dari 32 situs oktahedral diisi oleh kation Fe^{2+} divalen dan Fe^{3+} trivalen [23]. Magnetit (Fe_3O_4) memiliki sifat ferrimagnetik yang signifikan dengan saturasi magnetisasi (M_s) tinggi, mencapai 92 emu/g pada suhu kamar dan suhu Curie (T_c) sekitar 577°C. Namun, sifat magnetik Fe_3O_4 dipengaruhi oleh ukuran partikelnya. Ketika ukuran partikel ferrimagnetik tersebut mencapai skala nanometer, kurang dari 20 nm, maka partikel tersebut akan menunjukkan sifat superparamagnetik dan respons yang besar terhadap medan magnet yang diterapkan [24].

Bahan Fe_3O_4 memiliki aplikasi yang luas di berbagai bidang, termasuk bidang biomedis, konversi energi, penyimpanan energi, dan lingkungan [25]. Dalam konteks lingkungan, Fe_3O_4 telah banyak digunakan untuk menghilangkan logam berat dan melakukan adsorpsi/degradasi polutan organik dalam air [26]. Hal ini disebabkan oleh harga yang terjangkau, kemudahan dalam proses fabrikasi, biokompatibilitas, kemampuan pemisahan/pemulihan yang mudah melalui penggunaan medan magnet, dispersibilitas dalam larutan berair, dan kemampuan mu-

dah dipisahkan dari larutan menggunakan magnet eksternal [27].

Nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) telah menarik perhatian penelitian yang signifikan karena memiliki sifat unik seperti sifat magnetik, sifat listrik, aktivitas katalitik, biokompatibilitas, dan toksisitas yang rendah. Namun, partikel magnetit dalam skala nano cenderung beragregasi membentuk partikel yang lebih besar, mengurangi luas permukaan spesifik yang besar dan dispersibilitas, yang akhirnya dapat merusak aktivitas katalitik [28]. Fe_3O_4 telah menjadi objek penelitian yang mendalam karena memiliki sifat-sifat menarik yang memungkinkan untuk dievaluasi dan diaplikasikan sebagai agen katalitik, sensor gas, agen pengolahan air, remediasi lingkungan, agen kontras resonansi magnetik, dan perangkat elektronik [29].

Silika Dioksida (SiO_2)

Silika adalah suatu bahan padat yang memiliki struktur berpori, dan ukuran pori-pori silika memiliki hubungan dengan luas permukaannya. Semakin kecil ukuran pori-pori silika, semakin besar luas permukaannya, yang pada gilirannya meningkatkan kemampuan adsorpsi [30]. Silika seringkali digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan limbah, sebagai pembawa dalam sistem pengiriman obat, sebagai pendukung katalis, dan sebagai bahan untuk penyimpanan energi [31].

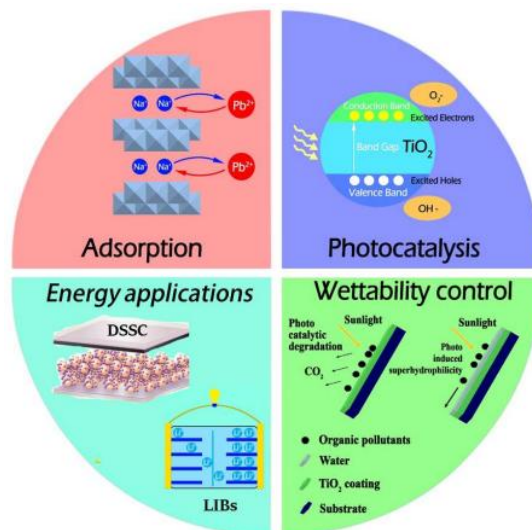
Dengan adanya penelitian yang terus berkembang setiap tahunnya, material canggih seperti SiO_2 dan $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ semakin menarik perhatian dalam mengatasi polusi air. Hasil penelitian mengenai kedua material ini dalam berbagai aplikasi dapat ditemukan pada Tabel 2. Sebuah studi tentang SiO_2 menyatakan bahwa material ini memiliki karakteristik area permukaan yang tinggi, yang dapat meningkatkan kekuatan mekanik produk material dengan menggunakan teknologi nano [32]. SiO_2 juga sering digunakan dalam aplikasi imobilisasi fotokatalis untuk menjaga stabilitas dan dispersi partikel inti [33]. Dengan melakukan doping SiO_2 pada material canggih, dapat diperoleh nilai transport massa yang tinggi serta selektivitas yang lebih baik terhadap polutan yang dituju [34]. Selain itu, inti silikon dioksida berperan sebagai pusat penangkapan elektron yang dapat mengurangi tingkat rekombinasi dan berkontribusi pada peningkatan laju fotokatalisis [35].

Keunggulan lain dari SiO_2 adalah sifatnya yang murah dan praktis dalam menyerap polutan air. Penelitian [36] berhasil mensintesis nanopartikel SiO_2 sebagai adsorben efektif untuk menghilangkan polutan logam seperti Cu^{2+} dan NO_3^- . SiO_2 telah dikom-

binasikan dengan berbagai senyawa lain seperti grafit, karbon TiO_2 , MnO , ZnO , Ag , Fe_2O_3 , dan Fe_3O_4 . Adapun keunggulan senyawa Fe_3O_4 diantaranya mudah didapatkan dan disintesis serta ramah lingkungan. Nanopartikel Fe_3O_4 dan SiO_2 akan menunjukkan aktivitas degradasi fotokatalitik yang sensitif terhadap berbagai polutan organik limbah di bawah iradiasi terlihat [37].

Titanium Dioksida (TiO_2)

Nanostruktur berbasis titanium dioksida (TiO_2) saat ini sedang digunakan dalam proses degradasi fotokatalitik untuk menghilangkan pencemar organik dan menjaga kelestarian lingkungan. Dengan keunggulan memiliki luas permukaan spesifik yang besar, kemampuan oksidasi yang tinggi, dan stabilitas kimia yang baik, TiO_2 telah menjadi salah satu kandidat terbaik dalam bidang fotokatalisis [38]. Titanium dioksida (TiO_2) dikenal sebagai fotokatalis yang paling efisien dibandingkan dengan oksida logam fotoaktif lainnya. Selain itu, keunggulan utamanya adalah biaya yang rendah. Namun, kelemahan TiO_2 terletak pada lebar celah pita yang hanya memungkinkan penyerapan radiasi UV, yang hanya mencakup sekitar 5% dari spektrum matahari [30]. Ilustrasi penggunaan bahan dasar titanium untuk lingkungan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Material nanotitanat dan nanotitania untuk aplikasi lingkungan dan energi [39].

Proses adsorpsi memiliki peran krusial dalam pengolahan air limbah. Saat proses ini berlangsung, molekul-molekul polutan tertarik dan diikat pada permukaan bahan penyerap. Selanjutnya Mekanisme degradasi fotokatalitik berbasis TiO_2 . Ketika foton radiasi ultraviolet (UV) dari sinar matahari atau sumber cahaya terang diserap oleh fotokatalis, akan menghasilkan pasangan elektron-celah. Elek-

tron-elektron yang awalnya berada di pita valensi titanium dioksida akan terangsang oleh energi foton, dan dipromosikan ke pita konduksi kosong dari titanium dioksida untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$), sementara elektron negatif di pita konduksi dapat menyerang molekul oksigen untuk menghasilkan anion peroksida untuk degradasi fotokatalitik senyawa organik. Morfologi nanotubular dan struktur saluran terbuka tetap dipertahankan pada material TiO_2 yang baru terbentuk dengan stabilitas dan kapasitas siklus yang lebih baik. Dari berbagai polimorf yang paling banyak dipelajari, TiO_2 memiliki kapasitas tertinggi dengan kemampuan laju yang menjanjikan [40]. TiO_2 mampu menampung satu ion Li^+ per Ti , memberikan kapasitas sebesar 335 mAh/g untuk TiO_2 nanotubular dan nanopartikel. Lalu sel-sel dari lapisan partikel semikonduktor nanokristalin (paling umum digunakan adalah TiO_2) [41] pada substrat penghantar diadsorpsi sebagai sensitizer dan elektrolit.

Terdapat beberapa metode yang telah dilaporkan untuk meningkatkan efisiensi TiO_2 . Salah satunya adalah dengan membentuk campuran TiO_2 yang mengurangi energi celah pita, melakukan doping dengan ion non-logam seperti karbon dan bele-rang, serta memuat dengan logam mulia seperti perak (Ag), platinum (Pt), dan emas (Au) yang mem-

perpanjang waktu rekombinasi elektron-hole. Saat ini, metode yang sedang mendapatkan perhatian signifikan adalah memuat partikel nanopori karbon murah pada TiO_2 NP, seperti konjugasi dengan karbon aktif yang dapat meningkatkan potensi adsorpsi TiO_2 NP [42]. TiO_2 merupakan bahan yang menarik karena memiliki konduktivitas elektronik yang sangat baik, sifat optik yang menguntungkan, dan stabilitas termal yang tinggi. Keunggulan-keunggulan ini menjadikannya bahan yang berguna dalam dekomposisi fotokatalitik polutan, sel surya, dan pemisahan air fotokimia. Namun, suspensi berair dari nanopartikel TiO_2 yang umumnya digunakan dalam reaksi fotokatalitik sulit untuk dipisahkan dan didaur ulang.

Kontak langsung antara fotokatalis magnetik Fe_3O_4 dan TiO_2 biasanya mengakibatkan peningkatan rekombinasi lubang elektron dan fotodisolusi. Penyisipan lapisan antara inti Fe_3O_4 dan TiO_2 memiliki dua efek positif dalam meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Pertama, lapisan tersebut memblokir injeksi elektron dari TiO_2 ke Fe_3O_4 di antarmuka, dan kedua, menyediakan permukaan berpori dengan rasio permukaan-ke-volume yang besar untuk reaksi fotokatalitik [43].

Berikut ditampilkan mengenai perkembangan penelitian Fe_3O_4 , SiO_2 dan TiO_2 dalam berbagai metode dan aplikasi.

Tabel 2. Perkembangan Penelitian pada Material SiO_2 , TiO_2 dan Fe_3O_4

Material	Metode Sintesis	Target polutan	Aplikasi	Ref
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	Kopresipitasi dan sol-gel	Metilen biru, ciprofloxacin, norfloxacin dan ibuprofen	Penjernihan air yang tercemar	[44]
$\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	Kopresipitasi dan sol-gel	metilen biru	Degradasi fotokatalitik polutan organik	[45]
Nano komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2\text{-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$	Solvothermal dan hidrotermal	Pewarna kationik dan anionik	Adsorpsi	[33]
Nano komposit $\text{SiO}_2/\text{graphite}$	Teknik <i>Hummers</i> melalui reaksi kimia bubuk karbon alami	Ion Pb (II)	Adsorpsi	[46][47]
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ difungsionalisasi biochar	<i>One-step pyrolysis</i>	Metilen biru	katalis untuk degradasi pewarna	[48]
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$	Hidrotermal	Metilen Biru	Degradasi metilen biru dibawah radiasi sinar matahari langsung	[49]
$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	Sol gel	Metilen biru	Degradasi metilen biru dibawah radiasi sinar UV	[50]
SiO_2 dengan $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}_2$	Multistep dan hidrotermal	Fenol	Degradasi yang didominasi oksigen	[51]
Nano partikel SiO_2	Metode ekstraksi dan presipitasi sederhana	Cu^{2+} dan NO_3^-	Adsorpsi	[36]
Nano komposit $\text{ZnO}.\text{SiO}_2$	kopresipitasi	Metil orange	Foto degradasi komponen pewarna	[35]

3 PENGEMBANGAN FOTOKATALIS $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$

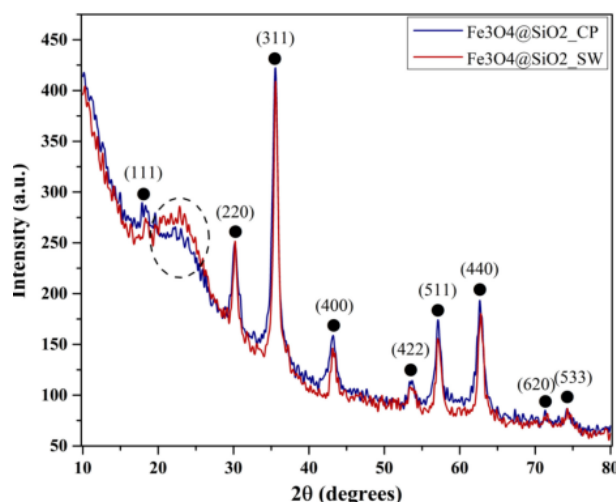
Pengembangan bahan fotokatalis berbasis magnetit dalam bentuk nano saat ini sedang menjadi topik penelitian yang populer. Pemanfaatan komposit nano oksida besi sebagai bahan feromagnetik memiliki kepentingan yang signifikan karena sifat-sifat baru

yang dimilikinya, biokompatibilitas yang baik, serta harga yang terjangkau. Fotokatalis semikonduktor magnetik menunjukkan stabilitas kimia dan struktural yang tinggi, sifat magnetik yang baik, celah pita sempit, kemampuan untuk menyerap cahaya tampak, dan memiliki potensi kinerja listrik yang baik [52].

Penelitian [53] menjelaskan bahwa bahan kimia berbasis gel silika-logam akan menyerap substrat. Asimilasi permukaan radikal alkoksil ke dalam koloid yang diberi pupuk logam Na akan mendekati substrat dan donor elektron. Penggunaan koloid sebagai pendukung juga akan meningkatkan luas dan efektivitas setiap substrat, serta konsentrasi logam di dalam pori-pori untuk mengurangi entropi aktivasi transfer electron [54]. Penelitian lain menggambarkan optimasi absorpsi optik nanopartikel campuran SiO_2/Au dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$. Koloid dengan sifat optik yang khas dapat menjadi agen transformasional untuk banyak aplikasi, terutama aplikasi medis, di mana mereka dapat mengaktifkan fungsi biomonitoring, bioimaging, dan terapi multimodal yang belum pernah terjadi sebelumnya. Dalam analisis yang dilakukan, ukuran partikel berkisar antara lima hingga seratus nanometer dan panjang gelombang berkisar antara 600 hingga 1200 nanometer. Ketebalan lapisan berkisar antara nol hingga 100 persen dari jari-jari partikel. Analisis juga menunjukkan bahwa campuran SiO_2/Au menunjukkan beberapa puncak absorpsi yang tajam dibandingkan dengan campuran $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$. Hal ini mungkin disebabkan oleh hilangnya inti Fe_3O_4 yang berkontribusi secara signifikan terhadap absorpsi [53]. Perluasan SiO_2 pada permukaan air pada suhu rendah sangat dipercepat jika unsur O_2 di eksitasi [55].

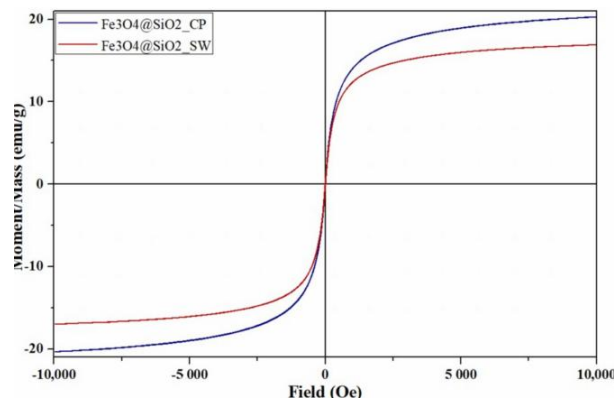
Pada kedua sampel, keberadaan fase amorf pada sudut 2θ sekitar 20-25 derajat akan dikaitkan dengan lapisan silikon dioksida dalam nanopartikel. Selain itu, dengan membandingkan kedua sampel dapat disimpulkan bahwa metode hidrotermal yang dibantu dengan mikrowave terkait dengan persentase silikon dioksida yang lebih tinggi dalam sampel, karena fase fenomena dalam sampel magnetit silika SW memiliki intensitas yang lebih tinggi. Akibatnya, kristalinitas sampel ini berkurang karena intensitas puncak fenomena fisik untuk sampel magnetit silika CP sedikit meningkat, seperti yang terlihat pada Gambar 3 [56]. Ukuran kristal untuk kedua sampel dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer

$$FWHM = \frac{K\lambda}{D\cos\theta} \quad (1)$$



Gambar 3. Difraktogram untuk sampel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2_{\text{CP}}$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2_{\text{SW}}$

Dalam persamaan Debye-Scherrer, FWHM merupakan lebar penuh pada setengah tinggi puncak, K adalah konstanta Scherrer yang memiliki rentang antara 0,89 dan 0,94, λ adalah panjang gelombang sinar-X, D adalah ukuran kristalit, dan θ adalah sudut difraksi [57][58]. Sementara itu, karakteristik magnetik dari nanopartikel inti-lapisan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ diuji menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) (Gambar 4).



Gambar 4. Pengukuran magnetisasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ yang disintesis melalui metode kopolimerisasi dan metode hidrotermal yang dibantu dengan gelombang mikro.

Perilaku superparamagnetik nanopartikel ini dapat diamati melalui kurva histeresis yang membentuk pola S antara magnetisasi dan medan magnet yang diterapkan, dengan lebar nol [59]–[61]. Sifat superparamagnetik ini memberikan peluang pengembangan aplikasi pengiriman obat, di mana nanopartikel yang membawa obat dapat diaktifkan dengan medan magnet eksternal dan kehilangan sifat magnetiknya setelah medan magnet dihilangkan [62]–[64]. Selain itu, nilai-nilai yang terkait dengan magnetisasi saturasi (M_s), magnetisasi remanen

(Mr), dan medan koersivitas (Hc) dari nanopartikel inti-lapisan tersebut dicatat dalam Tabel 3.

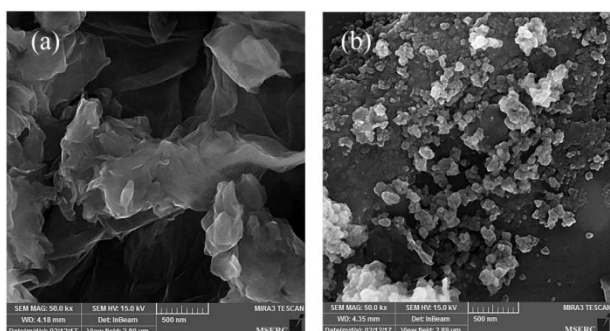
Tabel 3. Sifat-sifat magnetik dari nanosistem $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ yang disintesis melalui metode kopolimerisasi dan metode hidrotermal yang dibantu dengan mikro gelombang [56].

Sampel	Ms (emu/g)	Mr (emu/g)	Hc (Oe)
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ _CP	20.323	0.193	4.158
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ _SW	16.954	0.386	8.942

4 ANALISIS STUDI $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ PADA BEBERAPA METODE SINTESIS

Metode Ko-presipitasi

Beberapa metode nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ telah dilakukan, salah satunya dengan menggunakan metode ko-presipitasi [65] dengan melarutkan FeCl_2 dan FeCl_3 dalam jumlah tertentu dalam air suling. Lalu ditambah 10 mL HCl dan dipanaskan hingga 80°C . Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Bahare dkk. [66] menggunakan sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ untuk degradasi fotokatalitik 2,4-Dinitrofenol dari air limbah didapatkan hasil seperti pada gambar 5.

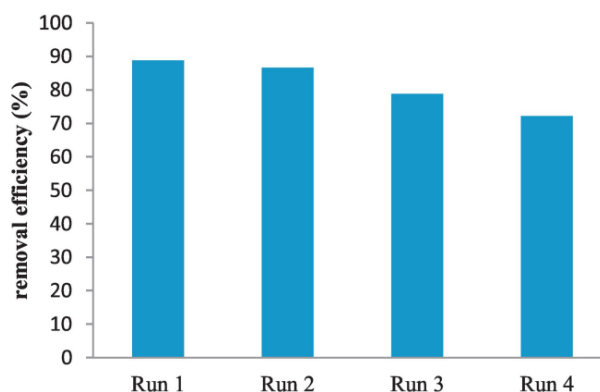


Gambar 5. FESEM dari Graphene Oxide (GO) (a) dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (b).

Seperti yang dapat terlihat, GO yang disintesis memiliki struktur lembaran. Pada gambar FESEM fotokatalis akhir (Gambar 5(b)), lamplan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ pada lembaran rGO sangat jelas terlihat. Oleh karena itu, pengasemblian diri antara dua bagian fotokatalis berhasil dilakukan. Penataan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ pada lembaran rGO menunjukkan bahwa nanopartikel teragregasi pada permukaan rGO dan memiliki distribusi yang tidak merata.

Sedangkan pada $\text{pH} \leq 7$, kondisi untuk membentuk muatan positif pada fotokatalis dan membentuk bentuk anionik polutan terpenuhi [66] Interaksi elektrostatis antara polutan dan fotokatalis mempengaruhi laju degradasi melalui pembentukan spesies oksidan yang berbeda. Sedangkan dari empat siklus

(Gambar 6) penggunaan fotokatalis, degradasi 2,4-DNP menurun dari 88,84% pada siklus pertama menjadi 72,26% pada siklus keempat. Penelitian oleh Wang et al [67] menunjukkan efisiensi penghilangan hingga 95% dalam waktu 150 menit. [68] mencapai efisiensi degradasi sebesar 80% setelah 6 siklus pemulihan, dengan penurunan kinerja hanya sebesar 10%.

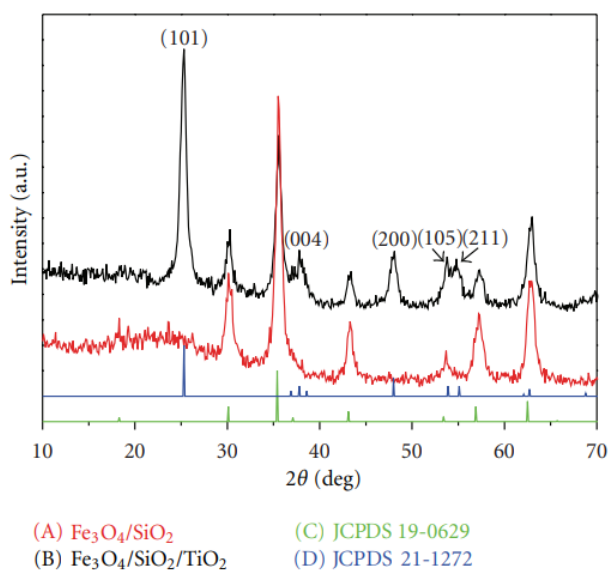


Gambar 6. Efisiensi degradasi 2,4-DNP pada 4 siklus pemulihan dalam waktu 30 menit.

Metode Sol-Gel

Terdapat juga penelitian yang dilakukan oleh Rijing Wang [69] untuk mengetahui kinerja fotokatalitik $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dengan melapisi SiO_2 sebagai lapisan dalam dan lapisan luar TiO_2 melalui proses sol-gel sederhana. Pelapisan silika ini merupakan langkah yang penting untuk menciptakan struktur inti-lapisan karena nanopartikel Fe_3O_4 yang bersifat hidrofobik sulit terbungkus dalam lapisan TiO_2 dengan mudah [70]. Selain itu, lapisan SiO_2 dapat terkelupas secara selektif pada mikrosfer magnetik TiO_2 berongga, sehingga memberikan ruang yang cukup untuk memuat bahan-bahan yang dapat menyerap gas tercemar atau air limbah.

Dalam eksperimen fotokatalitik, adapun penelitian tersebut didapatkan hasil xrd berupa semua puncak dapat diindeks sebagai fasa magnetit Fe_3O_4 (JCPDS 19-0629). Tidak ada puncak karakteristik SiO_2 yang terdeteksi, menunjukkan bahwa SiO_2 bersifat amorf. Sebaliknya, dalam Gambar 7(B), penutupan sukses TiO_2 dikonfirmasi oleh adanya puncak-puncak baru. Reduksi puncak-puncak Fe_3O_4 juga mengkonfirmasi penutupan TiO_2 yang berhasil. Sampel yang disiapkan menunjukkan kristalinitas yang baik dan puncak-puncak TiO_2 dapat dikaitkan dengan bidang-bidang (101), (004), (200), (105), dan (211) dari fasa anatase (JCPDS 21-1272).

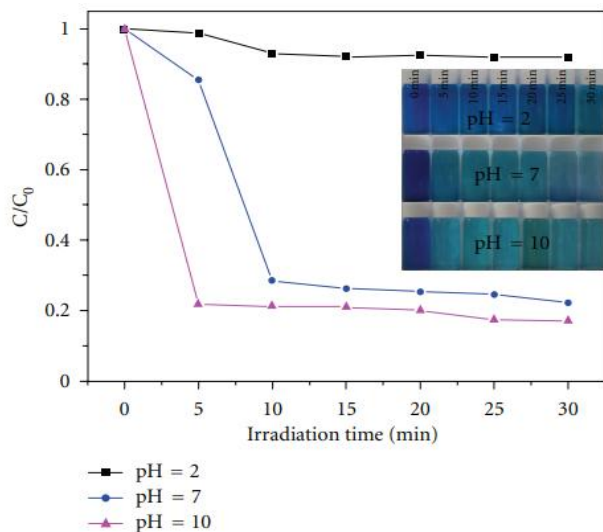


Gambar 7. Pola XRD dari komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ (A) dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (B)

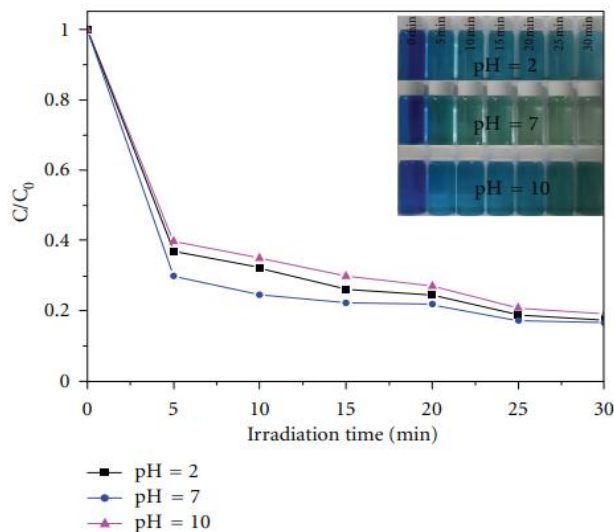
Sedangkan untuk hasil laju fotodegradasi (Gambar 8) MB lebih tinggi pada lingkungan netral dan basa. Terjadi fotodegradasi sebesar 78% pada larutan MB (pH = 10) setelah 5 menit di bawah sinar UV. Namun, dalam kondisi asam, hanya sebesar

8,5% MB yang terdegradasi setelah 30 menit. Seperti yang terlihat dalam gambar digital larutan MB di bawah sinar UV pada berbagai nilai pH. Warna larutan MB memudar secara bertahap seiring waktu pencahayaan pada pH = 7 dan 10, tetapi tidak ada perubahan warna yang jelas pada pH = 2. [69].

Hal ini disebabkan oleh pengaruh pH terhadap sifat adsorpsi senyawa organik dan keadaan terdisosiasi mereka dalam larutan. Sifat muatan permukaan TiO_2 juga berubah dengan perubahan nilai pH karena perilaku amfoterik TiO_2 semikonduktor [71]. Gambar 3(b) menunjukkan bahwa efisiensi fotodegradasi MB pada berbagai nilai pH dengan H_2O_2 dapat mencapai 60% setelah 5 menit di bawah iradiasi UV. H_2O_2 meningkatkan kemampuan fotodegradasi yang disebabkan oleh perilaku penerima elektronnya, yang bereaksi dengan elektron dari jalur konduksi untuk menghasilkan radikal hidroksil. Titik muat nol (pzc) untuk titanium dioksida terletak pada pH 6,5. Permukaan TiO_2 bermuatan positif dalam larutan asam dan bermuatan negatif dalam larutan basa [72]. Karena MB adalah pewarna kationik, dapat dimengerti bahwa pada nilai pH yang lebih tinggi, adsorpsinya lebih diuntungkan pada permukaan yang bermuatan negatif.



(a)



(b)

Gambar 8. Efisiensi fotodegradasi dari mikrosfer komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dan foto iluminasi digital pada pH 2, 7, dan 10 (a) dengan 1 mL H_2O (b) dengan 1 mL H_2O_2

Metode Hidrotermal

Sintesis hidrotermal memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode lain seperti harga yang relatif rendah, tidak beracun, menggunakan bahan baku

yang ramah lingkungan, dan prosedur yang sederhana. Pembentukan nanopartikel berkualitas tinggi dengan ukuran dan distribusi ukuran yang terkendali dapat dicapai dengan memilih campuran pelarut

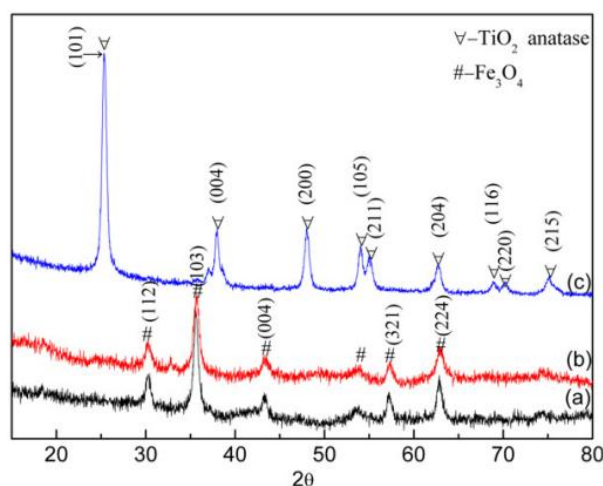
yang sesuai dan mengatur parameter seperti suhu, tekanan, dan interval waktu [73].

Berdasarkan penelitian oleh Gholamrezaei dkk [74], metode hidrotermal menyediakan orientasi morfologis yang sesuai. Dalam kondisi khusus yang berbeda, seperti suhu dan tekanan tinggi, pendekatan ini menghasilkan bentuk yang berbeda secara in situ dan membentuk beberapa morfologi seperti nanopartikel, nanorod, dan nanoplate. Metode untuk sintesis Ag_2Te sangat sederhana, murah, dan dapat ditingkatkan dengan menggunakan prekursor dan pelarut yang tidak beracun (TeCl_4 sebagai prekursor Te). Bahan yang disintesis akan diolah lebih lanjut menjadi bahan aplikasi fotodegradasi untuk larutan metil orange. Sebagai hasilnya, lampu menghasilkan campuran UVA, berkisar dari 320 hingga 400 nm, dan UVB dengan panjang gelombang 290–320 nm, dan mengeluarkan radiasi sebesar 13,6 dan 3,0 W masing-masing tidak mengandung ozon dan radiasi diinkapsulasi dalam tabung kuarza, yang mengambang di dalam larutan methyl orange yang terletak di pusat reaktor [74].

Adapun penelitian oleh Yanhua dkk yang mensintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dengan metode sintesis hidrotermal dan menganalisis sifat-sifatnya dengan inti magnetik Fe_3O_4 dilapisi oleh lapisan SiO_2 dan lapisan TiO_2 . Proses sintesis dilakukan secara sederhana dan efisien. Karakterisasi menggunakan teknik difraksi sinar-X (XRD), mikroskopi transmisi elektron (TEM), dan spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FT-IR) menunjukkan bahwa nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ memiliki kristalinitas yang baik dan struktur inti-lapisan yang jelas. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa nanokomposit ini memiliki performa fotokatalitik yang baik dalam dekolorisasi larutan metil oranye. Selain itu, inti magnetik yang dilapisi oleh lapisan SiO_2 dan TiO_2 tetap mempertahankan sifat magnetik yang baik, memungkinkan pemulihan katalis menggunakan medan magnet eksternal. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang sintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dan menunjukkan potensi aplikasi dalam bidang fotokatalisis dan pemulihan katalis [75].

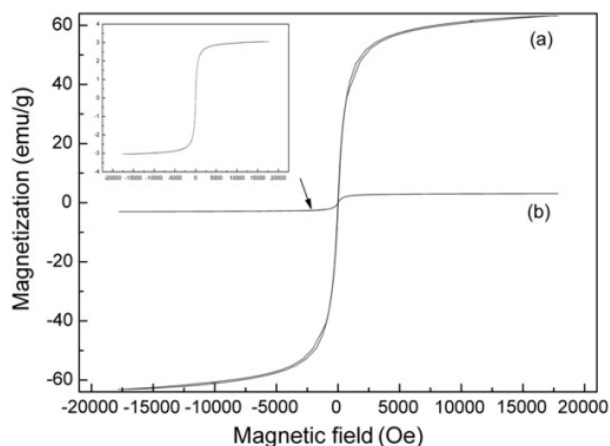
Sebagai metode yang umum digunakan, XRD digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan struktur fasa, ukuran kristalit, dan kristalinitas relatif dari sampel. Dalam Gambar 9(a), terlihat pola XRD dari inti magnetik Fe_3O_4 , menunjukkan puncak-puncak karakteristik struktur ortorombik. Pada Gambar 9(b), puncak-puncak difraksi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ mirip dengan partikel Fe_3O_4 asli, menunjukkan bahwa struktur fasa dari partikel magnetik tetap terjaga setelah pembentukan lapisan SiO_2 luar. Puncak di-

fraksi SiO_2 tidak terlihat karena sifatnya yang amorf. Gambar 9(c) menampilkan pola difraksi TiO_2 yang terkristalisasi dengan baik, dengan fase anatase yang diindeks. Hasil ini mendukung bahwa TiO_2 yang dilapisi pada inti magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ terkristalisasi dengan baik pada suhu 140°C melalui metode sintesis hidrotermal. Karena kandungan Fe_3O_4 yang sangat rendah dalam $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, tidak terlihat adanya fasa kristalin yang mengandung Fe_3O_4 .



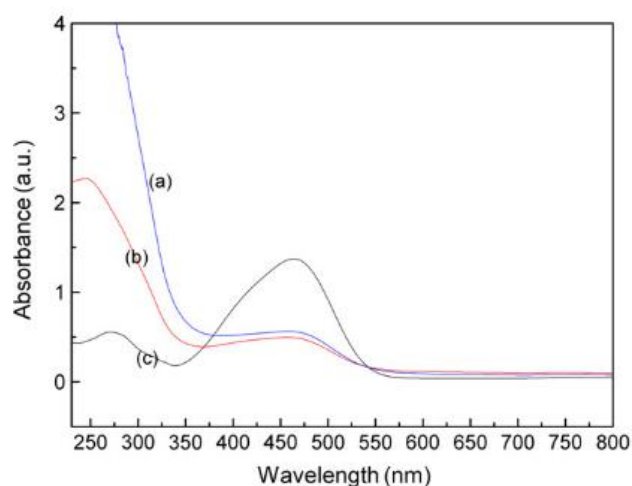
Gambar 9. Pola XRD (a): Fe_3O_4 ; (b): $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$; (c): $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$

Gambar 10 menampilkan loop histeresis magnetik dari partikel Fe_3O_4 dan partikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$. Keduanya menunjukkan perilaku ferromagnetik pada suhu kamar. Nilai magnetisasi saturasi (M_s) dari partikel Fe_3O_4 murni dan partikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ adalah 63,17 dan 3,04 emu/g masing-masing. M_s partikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ lebih rendah dibandingkan dengan partikel Fe_3O_4 murni karena kandungan massa Fe_3O_4 yang lebih rendah dalam partikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$. Meskipun demikian, sifat magnetik ini menunjukkan bahwa nanokomposit magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dapat dipisahkan dari suspensi menggunakan medan magnet eksternal. Selain itu, magnetisasi saturasi setelah menyimpan sampel di udara selama sekitar 6 bulan hampir tidak berubah (perubahan kurang dari 5%), hal ini serupa dengan hasil yang dilaporkan dalam literatur [76].



Gambar 10. Kurva magnetisasi (a) Fe_3O_4
(b) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$

Sedangkan untuk degradasi pada gambar 11, menunjukkan bahwa puncak absorpsi methyl orange muncul pada panjang gelombang 465 nm, yang intensitasnya menurun setelah reaksi fotokatalisis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ selama 30 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa methyl orange perlahan-lahan mengalami dekolonisasi oleh fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ di bawah sinar iradiasi. Selain itu, aktivitas fotokatalisis partikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ sama dengan TiO_2 murni, yang berarti bahwa inti magnetik Fe_3O_4 dan lapisan SiO_2 tidak secara signifikan mengurangi aktivitas fotokatalisis TiO_2 .



Gambar 11. Absorpsi metil orange (a) TiO_2
(b) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (c) tanpa fotokatalis selama 30 menit.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjauan, kami menyimpulkan bahwa terdapat 3 metode sintesis yang menguntungkan seperti kopresipitasi, sol gel dan hidrotermal. Namun metode hidrotermal sendiri memiliki keunggulan dibandingkan metode lain seperti biaya

yang relatif rendah, tidak beracun, bahan baku yang ramah lingkungan, dan prosedur yang sederhana. Adapun SiO_2 , TiO_2 dengan Fe_3O_4 menarik perhatian kami karena dapat disintesis dengan mudah dan diproses secara cepat dari bahan alami yang ditemukan di alam. Karakterisasi yang perlu dilakukan meliputi XRD, SEM, dan VSM serta AAS. XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal sampel. SEM memberikan informasi tentang permukaan sampel dan komposisinya, sedangkan VSM digunakan untuk mengamati sifat magnetik suatu bahan. Sementara AAS untuk mengamati efisiensi degradasi sampel dibawah sinar matahari atau UV. Dilihat dari kemampuan kombinasi material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ sebagai bahan adsorpsi, katalisis, dan filtrasi, material-material ini memiliki potensi besar dalam mengatasi polusi air di lingkungan terutama dalam penyerapan zat warna pada metilen biru maupun orange. Kami berharap di masa depan akan ada lebih banyak penelitian laboratorium yang mengintegrasikan pengembangan material silika, titanium dan magnetit yang luar biasa untuk mengatasi polusi air di lingkungan.

REFERENSI

- [1] A. Y. Putra and F. Mairizki, "Penentuan Kandungan Logam Berat Pada Air Tanah Di Kecamatan Kubu Babussalam, Rokan Hilir, Riau," *J. Katalisator*, vol. 5, no. 1, p. 47, 2020, doi: 10.22216/jk.v5i1.5277.
- [2] Y. Pasmawati, R. Renilaili, C. D. Kusmindari, A. Zahri, and S. Hardini, "Pengolahan Air Rawa Menjadi Air Bersih," *J. Altifani Penelit. dan Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 3, no. 1, pp. 27–33, 2023, doi: 10.25008/altifani.v3i1.317.
- [3] B. K. Mishra, P. Kumar, C. Saraswat, S. Chakraborty, and A. Gautam, "Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 4, 2021, doi: 10.3390/w13040490.
- [4] R. Erdoo Kukwa, D. Tyoker Kukwa, A. David Oklo, T. Thaddeus Ligom, B. Ishwah, and J. Ajegi Omenka, "Adsorption Studies of Silica Adsorbent Using Rice Husk as a Base Material for Metal Ions Removal from Aqueous Solution," *Am. J. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 2, p. 48, 2020, doi: 10.11648/j.ajche.20200802.12.
- [5] R. Teschke, "Aluminum, Arsenic, Beryllium, Cadmium, Chromium, Cobalt, Copper, Iron, Lead, Mercury, Molybdenum, Nickel, Platinum, Thallium, Titanium, Vanadium, and Zinc: Molecular Aspects in Experimental Liver Injury," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 20, 2022, doi: 10.3390/ijms232012213.
- [6] Mutia Oktarina Permai Yenny, Arief Hartono, Syaiful Anwar, and Yumei Kang, "Assessment of heavy metals pollution in sediment of Citarum River, Indonesia," *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkung. (Journal*

- Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 10, no. 4, pp. 584–593, 2020, doi: 10.29244/jpsl.10.4.584-593.
- [7] A. Boretti and L. Rosa, “Reassessing the projections of the World Water Development Report,” *npj Clean Water*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.1038/s41545-019-0039-9.
- [8] R. Yousif, M. I. CHOUDHARY, S. AHMED, and Q. AHMED, “Review: Bioaccumulation of heavy metals in fish and other aquatic organisms from Karachi Coast, Pakistan,” *Nusant. Biosci.*, vol. 13, no. 1, pp. 73–84, 2021, doi: 10.13057/nusbiosci/n130111.
- [9] S. Firza, S. Nita, S. A. Fitri, and J. Akmal, “Time milling influence on the size of the Lemabang iron sand powder synthesized by using high energy milling method,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1091, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1091/1/012008.
- [10] N. Esfandiari, M. Kashefi, S. Afsharnejhad, and M. Mirjalili, “Insight into enhanced visible light photocatalytic activity of Fe₃O₄-SiO₂-TiO₂ core-multishell nanoparticles on the elimination of *Escherichia coli*,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 244, no. September 2019, p. 122633, 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.122633.
- [11] J. Gunlazuardi, A. Fisli, Ridwan, Y. K. Krisnandi, and D. Robert, “Magnetically Separable Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ Photocatalyst Composites Prepared through Hetero Agglomeration for the Photocatalytic Degradation of Paraquat,” *Makara J. Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 236–246, 2021, doi: 10.7454/mss.v25i4.1277.
- [12] S. Behzadi, B. Nonahal, S. J. Royae, and A. A. Asadi, “TiO₂/SiO₂/Fe₃O₄ magnetic nanoparticles synthesis and application in methyl orange UV photocatalytic removal,” *Water Sci. Technol.*, vol. 82, no. 11, pp. 2432–2445, 2020, doi: 10.2166/wst.2020.509.
- [13] N. Rahimi, R. A. Pax, and E. M. A. Gray, “Review of functional titanium oxides. I: TiO₂ and its modifications,” *Prog. Solid State Chem.*, vol. 44, no. 3, pp. 86–105, 2016, doi: 10.1016/j.progsolidstchem.2016.07.002.
- [14] H. E. Cheng, C. H. Hung, I. S. Yu, and Z. P. Yang, “Strongly enhancing photocatalytic activity of TiO₂ thin films by multi-heterojunction technique,” *Catalysts*, vol. 8, no. 10, 2018, doi: 10.3390/catal8100440.
- [15] S. Wardiyati *et al.*, “Pengaruh Penambahan SiO₂ Terhadap Karakteristik Dan Kinerja Fotokatalitik Fe₃O₄/TiO₂ Pada Degradasi Methylene Blue (The SiO₂ Addition Effect to Fe₃O₄/TiO₂ Photocatalytic Characteristic And Perfor,” pp. 37–40, 2016.
- [16] J. L. Marques *et al.*, “Removal of Al (III) and Fe (III) from binary system and industrial effluent using chitosan films,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 120, pp. 1667–1673, 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.09.135.
- [17] D. Bouazza, H. Miloudi, M. Adjdir, A. Tayeb, and A. Boos, “Competitive adsorption of Cu (II) and Zn (II) on impregnate raw Algerian bentonite and efficiency of extraction,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 151, pp. 118–123, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.clay.2017.10.026.
- [18] M. Kavand, P. Eslami, and L. Razeh, “The adsorption of cadmium and lead ions from the synthesis wastewater with the activated carbon: Optimization of the single and binary systems,” *J. Water Process Eng.*, vol. 34, no. 101151, 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101151.
- [19] Y. Wei *et al.*, “Fast and efficient removal of As(III) from water by CuFe₂O₄ with peroxymonosulfate: Effects of oxidation and adsorption,” *Water Res.*, vol. 150, pp. 182–190, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2018.11.069.
- [20] T. Girardet, P. Venturini, H. Martinez, J. C. Dupin, F. Cleymand, and S. Fleutot, “Spinel Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Properties, Synthesis and Washing Methods,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 16, 2022, doi: 10.3390/app12168127.
- [21] A. A. Usman and Mashuri, “Magnetic properties of rGO/Fe₃O₄ microparticles composites based on natural materials,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2120, 2019, doi: 10.1063/1.5115688.
- [22] S. Salsabila, L. Rohman, and E. Purwandari, “Study of the Ferromagnetic Magnetite Resonance (Fe₃O₄) Forms of Thin Films Using Micromagnetic Simulation,” *Comput. Exp. Res. Mater. Renew. Energy*, vol. 3, no. 1, p. 10, 2020, doi: 10.19184/cerimre.v3i1.26414.
- [23] S. Mitra, High-Pressure Geochemistry and Mineral Physics Basics for Planetology and Geo-material Science: Chapter 9 - AB₂X₄ Structure, vol. 9. 2007. doi: 10.31826/9781463217822-010.
- [24] K. Nee Koo, A. Fauzi Ismail, M. Hafiz Dzarfan Othman, M. A. Rahman, and T. Zhong Sheng, “Preparation and characterization of superparamagnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles: A short review,” *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 23–31, 2019.
- [25] N. Minh Dang, T. Hung-Vu, X. Shoujun, and L. T. Randall, “Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11301, pp. 1–34, 2021.
- [26] S. Liu, B. Yua, S. Wanga, Y. Shena, and H. Conga, “Preparation, Surface Functionalization and Application of Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles Shixiang Liu,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 281, no. 102165, 2020.
- [27] D. Lisjak and A. Mertelj, “Anisotropic magnetic nanoparticles: A review of their properties, syntheses and potential applications,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 95, pp. 286–328, 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.03.003.
- [28] X. Yang, W. Chen, J. Huang, Y. Zhou, Y. Zhu, and C. Li, “Rapid degradation of methylene blue in a novel heterogeneous Fe₃O₄@rGO@TiO₂-catalyzed photo-Fenton system,” *Sci. Rep.*, vol. 5, no. May, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1038/srep10632.
- [29] J. A. Fuentes-García, A. I. Diaz-Cano, A. Guillen-Cervantes, and J. Santoyo-Salazar, “Magnetic domain interactions of Fe₃O₄ nanoparticles embedded in a SiO₂ matrix,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 2–11, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-23460-w.

- [30] K. T. Drisya *et al.*, "Electronic and optical competence of TiO₂/BiVO₄ nanocomposites in the photocatalytic processes," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-69032-9.
- [31] M. Ulfa, D. Prasetyoko, W. Trisunaryanti, H. Bahruji, and Z. A. Fadila, "The effect of gelatin as pore expander in green synthesis mesoporous silica for methylene blue adsorption," *Sci. Rep.*, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-19615-5.
- [32] W. Li *et al.*, "Experimental study on shear property and rheological characteristic of superfine cement grouts with nano-SiO₂ addition," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117046.
- [33] S. Narzary, K. Alamelu, V. Raja, and B. M. Jaffar Ali, "Visible light active, magnetically retrievable Fe₃O₄@SiO₂@g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite as efficient photocatalyst for removal of dye pollutants," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 5, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.104373.
- [34] Q. Feng *et al.*, "Synthesis of high specific surface area silica aerogel from rice husk ash via ambient pressure drying," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 539, pp. 399–406, 2018, doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.12.025.
- [35] S. Rohilla *et al.*, "Excellent uv-light triggered photocatalytic performance of zno.Sio₂ nanocomposite for water pollutant compound methyle orange dye," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 10, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/nano11102548.
- [36] P. Sharma, J. Kherb, J. Prakash, and R. Kaushal, "A novel and facile green synthesis of SiO₂ nanoparticles for removal of toxic water pollutants," *Appl. Nanosci.*, vol. 13, no. 1, pp. 735–747, 2023, doi: 10.1007/s13204-021-01898-1.
- [37] H. R. Ali, H. N. Nassar, and N. S. El-Gendy, "Green synthesis of α -Fe₂O₃ using Citrus reticulatum peels extract and water decontamination from different organic pollutants," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 39, no. 13, pp. 1425–1434, 2017, doi: 10.1080/15567036.2017.1336818.
- [38] Y. Ma, Y. Wang, T. Jiang, F. Zhang, X. Li, and Y. Zhu, "Hydrothermal synthesis of novel 1-aminoperylene diimide/TiO₂/MoS₂ composite with enhanced photocatalytic activity," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-78894-y.
- [39] Y. Zhang *et al.*, "Titanate and titania nanostructured materials for environmental and energy applications: A review," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 97, pp. 79479–79510, 2015, doi: 10.1039/c5ra11298b.
- [40] A. G. Dylla, G. Henkelman, and K. J. Stevenson, "Acc. Chem. Res.", 2013, 46, 1104–1112., *Acc. Chem. Res.*, vol. 46, no. 1104–1112, 2013.
- [41] M. Lv *et al.*, "v," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 1615–1622, 2013.
- [42] M. Abd Elkodous *et al.*, "Carbon-dot-loaded CoxNi_{1-x}Fe₂O₄; x = 0.9/SiO₂/TiO₂ nanocomposite with enhanced photocatalytic and antimicrobial potential: An engineered nanocomposite for wastewater treatment," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–22, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-68173-1.
- [43] F. Wang *et al.*, "Corn-like, recoverable γ -Fe₂O₃@SiO₂@TiO₂ photocatalyst induced by magnetic dipole interactions," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 2–11, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-07417-z.
- [44] S. Teixeira *et al.*, "Photocatalytic degradation of recalcitrant micropollutants by reusable Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ particles," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 345, pp. 27–35, 2017, doi: 10.1016/j.jphotochem.2017.05.024.
- [45] H. H. Mungondori, S. Ramujana, D. M. Katwire, and R. T. Taziwa, "Synthesis of a novel visible light responsive γ -Fe₂O₃/SiO₂/C-TiO₂ magnetic nanocomposite for water treatment," *Water Sci. Technol.*, vol. 78, no. 12, pp. 2500–2510, 2018, doi: 10.2166/wst.2019.004.
- [46] N. Yan *et al.*, "Hollow Porous SiO₂ nanocubes towards high-performance anodes for lithium-ion batteries," *Sci. Rep.*, vol. 3, pp. 1–6, 2013, doi: 10.1038/srep01568.
- [47] L. Hao, H. Song, L. Zhang, X. Wan, Y. Tang, and Y. Lv, "SiO₂/graphene composite for highly selective adsorption of Pb(II) ion," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 369, no. 1, pp. 381–387, 2012, doi: 10.1016/j.jcis.2011.12.023.
- [48] X. L. Chen, F. Li, H. Y. Chen, H. J. Wang, and G. G. Li, "Fe₂O₃/TiO₂ functionalized biochar as a heterogeneous catalyst for dyes degradation in water under Fenton processes," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103905.
- [49] G. Shilpa, P. M. Kumar, P. R. Deepthi, A. Sukhdev, P. Bhaskar, and D. K. Kumar, "Improved Photocatalytic Performance of Fe₃O₄/TiO₂ Thin Film in the Degradation of MB Dye Under Sunlight Radiation," *Brazilian J. Phys.*, vol. 53, no. 2, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1007/s13538-022-01243-z.
- [50] A. Babyszko, A. Wanag, M. Sadłowski, E. Kusiak-Nejman, and A. W. Morawski, "Synthesis and Characterization of SiO₂/TiO₂ as Photocatalyst on Methylene Blue Degradation," *Catalysts*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/catal12111372.
- [51] J. Wang *et al.*, "SiO₂ mediated templating synthesis of γ -Fe₂O₃/MnO₂ as peroxy monosulfate activator for enhanced phenol degradation dominated by singlet oxygen," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 560, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.149984.
- [52] P. Mishra, S. Patnaik, and K. Parida, "An overview of recent progress on noble metal modified magnetic Fe₃O₄ for photocatalytic pollutant degradation and H₂ evolution," *Catal. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 916–941, 2019, doi: 10.1039/c8cy02462f.
- [53] X. Xue, V. Sukhotskiy, and E. P. Furlani, "Optimization of Optical Absorption of Colloids of SiO₂@Au and Fe₃O₄@Au Nanoparticles with Constraints," *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1038/srep35911.
- [54] M. Kapoor and J. R. Hwu, "Na@SiO₂-Mediated Addition of Organohalides to Carbonyl Compounds for

- the Formation of Alcohols and Epoxides," *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 6–13, 2016, doi: 10.1038/srep36225.
- [55] S. Gurbán *et al.*, "Electron irradiation induced amorphous SiO₂ formation at metal oxide/Si interface at room temperature; Electron beam writing on interfaces," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-20537-4.
- [56] B. S. Vasile, C. Chircov, M. Matei, and I. A. Neacs, "Iron Oxide – Silica Core – Shell Nanoparticles Functionalized with Essential Oils for Antimicrobial Therapies," pp. 1–26, 2021.
- [57] M. F. Ingham, B., & Toney, X-ray diffraction for characterizing metallic films. In *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. 2014.
- [58] J. R. Ross and Elsevier, *Catalyst characterization*. In *Contemporary Catalysis*. 2019.
- [59] Sunaryono *et al.*, "Magneto-elasticity in hydrogels containing Fe₃O₄ nanoparticles and their potential applications," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1555, no. 1555, pp. 53–56, 2013, doi: 10.1063/1.4820992.
- [60] I. Morales *et al.*, "High frequency hysteresis losses on γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄: Susceptibility as a magnetic stamp for chain formation," *Nanomaterials*, vol. 8, no. 12, 2018, doi: 10.3390/nano8120970.
- [61] L. Maldonado-Camargo, M. Unni, and C. Rinaldi, "Magnetic characterization of iron oxide nanoparticles for biomedical applications," *Methods Mol. Biol.*, vol. 1570, pp. 47–71, 2017, doi: 10.1007/978-1-4939-6840-4_4.
- [62] J. X. J. Zhang and K. Hoshino, *Nanomaterials for molecular sensing*. In *Molecular Sensors and Nanodevices*, 2nd ed. 2019.
- [63] S. S. Mohapatra, S. Ranjan, N. Dasgupta, R. K. Mishra, S. Thomas, and Elsevier, *Nanohybrid filler-based drug-delivery system*. In *Nanocarriers for Drug Delivery*. 2019.
- [64] M. Montazer and T. Harifi, *Magnetic nanofinishes for textiles*. In *Nanofinishing of Textile Materials*. 2018.
- [65] R. Rezaei Kalantary *et al.*, "Nitrate adsorption by synthetic activated carbon magnetic nanoparticles: kinetics, isotherms and thermodynamic studies," *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, no. 35, pp. 16445–16455, 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1079251.
- [66] B. MirzaHedayat, M. Noorisepehr, E. Dehghanifard, A. Esrafil, and R. Norozi, "Evaluation of photocatalytic degradation of 2,4-Dinitrophenol from synthetic wastewater using Fe₃O₄@SiO₂@TiO₂/rGO magnetic nanoparticles," *J. Mol. Liq.*, vol. 264, no. 2017, pp. 571–578, 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2018.05.102.
- [67] H. Wang, H. L. Wang, W. F. Jiang, and Z. Q. Li, "Photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol (DNP) by multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)/TiO₂ composite in aqueous solution under solar irradiation," *Water Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 204–210, 2009, doi: 10.1016/j.watres.2008.10.003.
- [68] G. D. Tarigh, F. Shemirani, and N. S. Maz'hari, "Fabrication of a reusable magnetic multi-walled carbon nanotube-TiO₂ nanocomposite by electrostatic adsorption: Enhanced photodegradation of malachite green," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 44, pp. 35070–35079, 2015, doi: 10.1039/c4ra15593a.
- [69] R. Wang, X. Wang, X. Xi, R. Hu, and G. Jiang, "Preparation and photocatalytic activity of magnetic Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ composites," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/409379.
- [70] C. Hui *et al.*, "Core-shell Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles synthesized with well-dispersed hydrophilic Fe₃O₄ seeds," *Nanoscale*, vol. 3, no. 2, pp. 701–705, 2011, doi: 10.1039/c0nr00497a.
- [71] G. Jiang *et al.*, "Preparation of Cu₂O/TiO₂ composite porous carbon microspheres as efficient visible light-responsive photocatalysts," *Powder Technol.*, vol. 212, no. 1, pp. 284–288, 2011, doi: 10.1016/j.powtec.2011.04.025.
- [72] R. Wang *et al.*, "Photocatalytic activity of heterostructures based on TiO₂ and halloysite nanotubes," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 3, no. 10, pp. 4154–4158, 2011, doi: 10.1021/am201020q.
- [73] J. Edianta, N. Fauzi, M. Naibaho, F. S. Arsyad, and I. Royani, "Review of the effectiveness of plant media extracts in barium hexaferrite magnets (BaFe₁₂O₁₉)," *Sci. Technol. Indones.*, vol. 6, no. 2, pp. 39–52, 2021, doi: 10.26554/STI.2021.6.2.39-52.
- [74] S. Gholamrezaei, M. Salavati-Niasari, D. Ghanbari, and S. Bagheri, "Hydrothermal preparation of silver telluride nanostructures and photo-catalytic investigation in degradation of toxic dyes," *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 1–13, 2016, doi: 10.1038/srep20060.
- [75] Y. Fan, C. Ma, W. Li, and Y. Yin, "Synthesis and properties of Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ nanocomposites by hydrothermal synthetic method," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 15, no. 5, pp. 582–585, 2012, doi: 10.1016/j.mssp.2012.04.013.
- [76] Y. Lu, Y. Yin, B. Mayers, and Y. Xia, *Nano Letters* 2. 2002.