

MINI REVIEW: SINTESIS NANOKOMPOSIT $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ DAN PENGGUNAANNYA SEBAGAI FOTOKATALIS

MINI REVIEW: SYNTHESIS OF $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ NANOCOMPOSITES AND THEIR USE AS PHOTOCATALYST

Elsa Avrilia Putriani¹, Noor Hindryawati^{2*}

¹Inorganic Laboratory, Departement of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Mulawarman University, Samarinda 76116 Indonesia

²Departement of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Mulawarman University, Samarinda 76116 Indonesia

*Corresponding author: hindryawati@gmail.com

ABSTRACT

Mini Review on Synthesis and Characterization of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ Nanocomposites as Photocatalysts aims to compare the photocatalytic activity of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposites in the process of dye degradation. $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposites are used because they have good photocatalytic activity properties in the process of dye photocatalysis. Based on existing literature, $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposites can be synthesized using several methods such as sol-gel, impregnation, precipitation and coprecipitation. Then applied to the degradation of dyes by considering time, type of light, dye concentration and catalyst. So, this article reviews the latest developments in $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanocomposites, especially in photocatalysts of methylene blue and methyl orange dyes by looking at the concentration of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ used.

Keywords : Photocatalysis, Fe_3O_4 Magnetite, Nanocomposites, TiO_2 .

ABSTRAK

Mini Review tentang Sintesis dan Karakterisasi Nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebagai fotokatalis bertujuan untuk membandingkan aktivitas fotokatalis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ dalam proses degradasi zat warna. Nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ini digunakan karena memiliki sifat aktivitas fotokatalitik yang baik dalam proses fotokatalis zat warna. Berdasarkan literatur yang ada nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ dapat disintesis dengan menggunakan beberapa metode seperti sol-gel, impregnasi, presipitasi dan kopresipitasi. Kemudian diaplikasikan pada pendegradasian zat warna dengan mempertimbangkan waktu, jenis cahaya, konsentrasi pewarna dan katalis. Jadi, artikel ini mengulas mengenai perkembangan terkini tentang nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ khususnya dalam fotokatalis zat warna metilen biru dan metil jingga dengan melihat konsentrasi $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ yang digunakan.

Kata kunci : Fotokatalis, Magnetit Fe_3O_4 , Nanokomposit, TiO_2 .

PENDAHULUAN

Pewarna sintesis seperti metilen biru [1] dan metil jingga sering kali digunakan pada sebagian besar industri tekstil karena sifatnya yang murah, mudah didapatkan, tahan lama dan mudah digunakan. Namun pewarna sintesis dapat menimbulkan limbah yang masih berwarna dan sulit terdegradasi [2], dapat menjadi agen yang sangat beracun, bersifat karsinogenik, mutagenik, dapat mencegah penetrasi cahaya melalui air, menyebabkan pengurangan aktivitas fotosintesis serta pengurangan kadar oksigen terlarut di badan air [3]. Sehingga dibutuhkan alternatif untuk mengolah limbah pewarna sintesis tersebut salah

satunya dengan menggunakan teknologi fotokatalis [2].

Menurut definisi IUPAC, fotokatalis adalah suatu reaksi kimia yang disebabkan oleh cahaya baik berupa cahaya ultraviolet, *visible* atau inframerah oleh material padat yang merupakan katalis dengan kemampuan untuk menyerap foton, dan umumnya dimiliki oleh material semikonduktor [2]. Teknologi fotokatalis ini kerap digunakan karena biaya produksinya yang rendah serta menghasilkan produk akhir yang tidak beracun [4]. Selain itu, teknologi fotokatalis ini berkembang pesat untuk berbagai tujuan dan mencakup keselamatan lingkungan, proses energi terbarukan, antibakteri serta pengolahan air [5].

Adapun beberapa material yang umum digunakan untuk proses fotokatalis diantaranya TiO_2 , ZnO , Fe_3O_4 , CdS , GaP , ZnS dan WO_3 [6]. Namun, semikonduktor yang paling sering dikembangkan yaitu titanium dioksida (TiO_2).

Titanium dioksida (TiO_2) merupakan salah satu material semikonduktor dengan struktur semikonduktor yang dikarakterisasi oleh pita valensi berisi elektron dan pita konduksi kosong dan dipisahkan oleh celah yang disebut *band gap* [7]. Fotokatalis berbasis TiO_2 ini sering digunakan karena memiliki stabilitas kimia yang tinggi, daya pengoksidasi yang kuat, tidak beracun, rendah biaya [8], fotoaktivitas yang efisien [3], kinerja dekomposisi tinggi, ketersediaan banyak [5], memiliki sifat optik yang lebar, daya degradasi yang kuat [9] tahan terhadap korosi efisiensi fotokatalisis yang tinggi stabilitas fisik yang baik [6] dan biokompabilitas [10]. Adapun aplikasi TiO_2 diantaranya sebagai fotokatalis, biomaterial, sel surya, pigmen, terapi antikanker, sensor gas, kapasitor, agen anti bakteri, *self-cleaning*, *drug delivery* dan degradasi limbah [2]. Namun di samping itu, TiO_2 juga memiliki berbagai kelemahan diantaranya memiliki celah pita rutil sebesar 3,0 eV dan anatase sebesar 3,20 eV yang dapat menurunkan penyerapan foton semikonduktor karena energi semikonduktor celah pita yang lebih besar dari energi foton cahaya [3], tingkat rekombinasi elektron-lubang yang tinggi dan kapasitas adsorpsi yang rendah [10]. Berdasarkan hal tersebut, maka diperlukannya modifikasi senyawa TiO_2 dengan cara mengembangkan TiO_2 pada suatu bahan matriks berpori atau ke dalam ruang antar lapisan [7] sehingga dapat terbentuk senyawa nanokomposit TiO_2 .

Nanokomposit merupakan material berukuran nano yang menggabungkan satu atau lebih komponen untuk menghasilkan sifat terbaik dari masing-masing komponen, dimana hasil dari nanokomposit dapat meningkatkan kekuatan mekanik, ketangguhan, konduktivitas listrik, ketahanan terhadap bahan kimia, tampilan permukaan dan stabilitas termal [2]. Adapun salah satu jenis modifikasi nanokomposit TiO_2 yaitu menggabungkan TiO_2 dengan oksida logam lain [8] dan diantara nanomaterial oksida besi yang ada, magnetit (Fe_3O_4) yang paling terkenal untuk

digabungkan dengan TiO_2 membentuk nanokomposit karena sifat supermagnetiknya [4].

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu jenis nanopartikel magnetik yang dihasilkan dari material nano dengan teknologi rekayasa [11] disamping material oksida besi lainnya seperti hematit (Fe_2O_3), limonite ($\text{FeO}(\text{OH})$) dan siderite (FeCO_3) [7]. Sifat magnetit (Fe_3O_4) telah banyak diaplikasikan dan salah satunya sebagai pemisah logam dalam pengolahan air limbah [11]. Selain itu berdasarkan studi lainnya pada partikel magnetik Fe_3O_4 menunjukkan efek yang menjanjikan dalam aktivitas fotokatalitik zat warna dibawah penyinaran cahaya tampak [4].

Oleh karena itu, *mini review* ini dibuat bertujuan untuk memberikan pemahaman mengenai nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ serta aplikasinya sebagai fotokatalis zat warna berupa metilen biru dan metil jingga. *Mini review* ini menggambarkan mengenai sintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$, aplikasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebagai katalis dalam fotokatalis zat warna metilen biru dan metil jingga serta variasi konsentrasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ untuk fotokatalis zat warna metilen biru dan metil jingga.

METODOLOGI PENELITIAN

Pada *mini review* ini dilakukan pencarian artikel yang berbasis elektronik yaitu *Science Direct* dan *Google Scholar*. Dimana artikel yang memenuhi syarat adalah artikel yang membahas mengenai sintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ dengan berbagai variasi konsentrasi dan metode untuk menghasilkan nanokomposit yang paling optimal untuk fotokatalis. Pencarian artikel ini menghasilkan 10 artikel yang sesuai dengan topik yang akan di-review.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sintesis Nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$

Setelah dilakukan pencarian artikel, diperoleh 10 jurnal yang sesuai dengan kriteria artikel yang membahas tentang sintesis dan karakterisasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebagai fotokatalis dengan beberapa macam metode yang sering digunakan serta aplikasinya. Berdasarkan **Tabel 1**, 10 jurnal yang diperoleh diterbitkan pada rentang tahun 2017 hingga 2024, dimana artikel paling banyak terbit pada tahun 2019.

Tabel 1. Informasi Umum

Nama Penulis	Tahun	Metode	Aplikasi
(Tedsree et al.)	2017	Sol-gel	Fotokatalis
(Kianfar & Arayesh)	2020	Sol-gel	Fotokatalis dan reduksi nitrofenol
(Hatefi et al.)	2021	Sol-gel	Fotokatalis
(Almutairi)	2024	Sol-gel	Fotokatalis
(Kartikowati et al.)	2024	Sol-gel	Fotokatalis
(Gebrezgiabher et al.)	2019	Sol-gel	Fotokatalis
(Gnanasekaran et al.)	2019	Sol-gel dan presipitasi	Fotokatalis
(Kustiningsih et al.)	2022	Presipitasi	Fotokatalis
(Sri Kunarti et al.)	2018	Impregnasi	Fotokatalis
(Mohd Razip et al.)	2019	Kopresipitasi	Fotokatalis

Berdasarkan pada **Tabel 1**, metode yang digunakan dalam mensintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ pada *mini review* ini adalah sol-gel, impregnasi, presipitasi dan kopresipitasi. Sol-gel merupakan suatu metode yang digunakan dalam mensintesis nanopartikel yang memiliki beberapa keunggulan diantaranya sederhana dan ekonomis serta efektif dalam mensintesis nano TiO_2 [19]. Adapun metode ini menggunakan prinsip pembentukan senyawa-senyawa awal (prekursor) yang terdiri dari senyawa metal organik maupun garam-garam organik, dimana terjadinya polimerisasi larutan, terbentuknya nanopartikel melalui proses pengeringan dan kalsinasi (pemanasan suhu tinggi) dengan tujuan untuk menghilangkan senyawa-senyawa organik sehingga terbentuk material anorganik yang berupa oksida [20]. Impregnasi merupakan suatu metode penggabungan dua atau lebih polimer yang memiliki sifat yang sama atau berbeda yang bertujuan untuk menghasilkan produk yang lebih kompatibel [21]. Presipitasi merupakan suatu

metode yang digunakan untuk mensintesis suatu senyawa dengan keunggulannya dapat dilakukan tanpa menggunakan pelarut organik, murah, cepat dan mudah dilakukan [22]. Kopresipitasi merupakan suatu metode yang digunakan untuk mensintesis senyawa anorganik dan didasarkan pada pengendapan lebih dari satu substansi. Adapun keunggulan dari metode ini yaitu menggunakan suhu rendah, mudah mengontrol ukuran partikel dan waktu yang dibutuhkan relatif singkat [23].

Pada umumnya, nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ dibuat dengan mencampurkan nanopartikel TiO_2 dan magnetit Fe_3O_4 , kemudian diendapkan nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$, dipisahkan dengan pelarutnya dan dikeringkan endapan dengan menggunakan oven. Untuk mengetahui lebih banyak mengenai sintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ penulis menyajikan informasi mengenai penggunaan bahan dalam sintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Penggunaan Bahan

Nama Penulis	Prekursor TiO_2	Magnetit	Katalis	Pelarut
(Tedsree et al.)	Titanium (IV) isopropoksida	Fe_3O_4	-	Trietanolamin
(Kianfar & Arayesh)	Titanium tetrabutoksida	Fe_3O_4	-	Etanol
(Hatefi et al.)	Titanium (IV) tetraisopropoksida	Fe_3O_4	HCl	2-propanol anhidrat
(Almutairi)	Titanium isoperoxida	Fe_3O_4	-	Asam asetat dan aquades

(Kartikowati et al.)	Titanium (IV) isopropoksida	Fe_3O_4	Air demineralisasi	Larutan campuran (Cetyltrimethylammonium bromide, Asam asetat, Etanol)
(Gebrezgiabher et al.)	Titanium klorida	Fe_3O_4	HCl encer	Etanol dan air deionisasi
(Gnanasekaran et al.)	Titanium (IV) isopropoksida	Fe_3O_4	Asam sitrat	Isopropanol
(Kustiningsih et al.)	TiO_2 Degussa	Fe_3O_4	Amonia	Aquades
(Sri Kunarti et al.)	TiO_2 Degussa	Fe_3O_4	-	Etanol
(Mohd Razip et al.)	TiO_2 Degussa	Fe_3O_4	Amonia	Air deionisasi

Berdasarkan pada **Tabel 2**, dimana bahan yang sering digunakan dalam sintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ialah magnetit Fe_3O_4 bersama prekursor Titanium (IV) isopropoksida dan TiO_2 Degussa. Namun, juga terdapat beberapa penelitian yang menggunakan prekursor lain seperti Titanium tetrabutoksida, Titanium isopropoksida, Titanium klorida dan Titanium (IV) tetraisopropoksida. Pelarut yang paling banyak digunakan yaitu etanol dan air deionisasi. Sedangkan untuk katalis yang paling sering digunakan yaitu HCl dan Amonia. Sehingga, berdasarkan pada **Tabel 2** dapat disimpulkan

bahwa bahan yang paling sering digunakan dalam pembuatan nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ yaitu prekursor TiO_2 Degussa bersama magnetit Fe_3O_4 dengan katalis Amonia dan pelarut air deionisasi (aquades).

B. Aplikasi Nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebagai Katalis dalam Fotokatalis Zat Warna

Pada bagian ini, penulis menyajikan informasi mengenai aplikasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ untuk fotokatalis zat warna dan diperoleh informasi sebagai berikut.

Tabel 3. Fotokatalis

Referensi	Pewarna	Konsentrasi Pewarna	Jenis Cahaya	Waktu (menit)	Konsentrasi Katalis ($\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$)	Efisiensi Degradasi (%)
[12]	Metilen biru	15 mg/L	Visible	240	0,01 g	95%
[13]	Metilen biru	10 ppm	UV	22	1 mg	99%
[3]	Metilen biru	10 mg/L	UVA	30	400 mg	86.06%
[14]	Metilen biru	40 mg/L	UV	90	20 mg	91.16%
[15]	Metil Jingga	4 ppm	UV	180	100 mg	33%
[8]	Metil jingga	20 mg/L	UV	150	20 mg	99.68%
[16]	Metilen biru, Metil jingga	5×10^{-5} mol/L	UV/Visible	60/120	1 g	75.3%, 70.8% / 80.8%, 76.9%

[2]	Metil jingga	4 ppm	Visible	60	-	44.23%
[17]	Metilen biru	5 mg/L	UV/Visible	210	10 mg	81.51% / 95.38%
[18]	Metil jingga	10 mg/L	UV	60	30 mg	90.3%

Berdasarkan pada **Tabel 3**, zat warna yang paling sering digunakan yaitu metilen biru dan metil jingga. Jenis cahaya lampu yang paling banyak yaitu UV. Konsentrasi optimum untuk metilen biru dari 10 jurnal tersebut adalah 10 ppm dengan konsentrasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebesar 1 mg dalam waktu penyinaran selama 22 menit menghasilkan efisiensi degradasi zat warna sebesar 99%. Sedangkan konsentrasi optimum untuk metil jingga dari 10 jurnal tersebut adalah 20 mg/L dengan konsentrasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebesar 20 mg dalam waktu penyinaran selama 150 menit menghasilkan efisiensi degradasi zat warna sebesar 99,68%.

Selanjutnya akan dibahas lebih detail mengenai aktivitas fotokatalis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$. Berdasarkan artikel [12], [14], [16], penelitian dilakukan dengan menggunakan metode sol-gel untuk mensintesis nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ dan aktivitas fotokatalisnya diaplikasikan pada zat warna metilen biru. Namun, terdapat perbedaan waktu, jenis cahaya, variasi konsentrasi pelarut maupun katalis yang digunakan, dimana efisiensi degradasi terbaik diperoleh pada aktivitas fotokatalis dengan menggunakan cahaya UV, konsentrasi metilen biru sebesar 10 ppm, konsentrasi katalis 1 mg dan waktu degradasi selama 22 menit yang menghasilkan efisiensi degradasi sebesar 99%.

Pada artikel [15], [8], [16] penelitian dilakukan juga dengan menggunakan metode sol-gel, namun aplikasi fotokatalisnya ditujukan untuk mendegradasi zat warna metil jingga. Dimana juga terdapat perbedaan waktu penyinaran, jenis cahaya, konsentrasi pewarna dan konsentrasi katalis. Berdasarkan ketiga artikel tersebut, diperoleh efisiensi degradasi metil jingga terbaik dengan menggunakan konsentrasi pewarna sebesar 20 mg/L, konsentrasi katalis sebesar 20 mg, waktu penyinaran selama 150 menit dengan menggunakan lampu UV yang menghasilkan efisiensi degradasi sebesar 99,68%.

Pada artikel [16], [2] penelitian dilakukan dengan menggunakan metode presipitasi yang mana aplikasi fotokatalis ditujukan pada zat warna metilen biru dan metil jingga. Adapun pada metode ini juga terdapat perbedaan waktu, konsentrasi

pewarna, konsentrasi katalis dan jenis cahaya. Didapatkan hasil terbaik dengan menggunakan metode presipitasi yaitu pada fotokatalis zat warna metilen biru dengan konsentrasi katalis sebesar 1 g, konsentrasi pewarna sebesar 5×10^{-5} mol/L menggunakan cahaya *visible* dalam waktu 120 menit dan menghasilkan efisiensi degradasi metilen biru sebesar 80.8%. Sedangkan pada fotokatalis metil jingga hasil terbaik diperoleh pada fotokatalis zat warna metil jingga dengan konsentrasi katalis 1 g, konsentrasi pewarna 5×10^{-5} mol/L dibawah penyinaran cahaya *visible* selama 120 menit menghasilkan efisiensi degradasi sebesar 76.9%.

Pada artikel [17] dengan menggunakan metode impregnasi aktivitas fotokatalis diaplikasikan pada zat warna metilen biru dengan menggunakan konsentrasi pewarna sebesar 5 mg/L, konsentrasi katalis 10 mg, dengan penyinaran mengenai cahaya UV dan *visible* selama 210 menit. Diperoleh hasil efisiensi degradasi metilen biru menggunakan cahaya UV sebesar 81.51% dan efisiensi degradasi metilen biru menggunakan cahaya *visible* sebesar 95.38%, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada degradasi ini lebih baik jika menggunakan cahaya lampu *visible*.

Pada artikel [18] dengan menggunakan metode kopresipitasi aktivitas fotokatalis diaplikasikan pada zat warna metil jingga menggunakan konsentrasi pewarna sebesar 10 mg/L, konsentrasi katalis 30 mg, penyinaran dibawah cahaya UV selama 60 menit, menghasilkan persen degradasi yang tinggi yaitu 90.3%.

Dengan demikian, *mini review* ini dapat memberikan wawasan mengenai sintesis dan karakterisasi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ untuk fotokatalis zat warna metilen biru dan metil jingga, dengan penekanan pengaruh konsentrasi katalis dan konsentrasi pewarna pada efisiensi degradasi metilen biru dan metil jingga.

KESIMPULAN

Dalam *mini review* ini telah dijelaskan mengenai fungsi nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ sebagai fotokatalis zat warna, dimana nanomaterial

TiO₂ sendiri memiliki banyak keunggulan seperti mudah didapatkan, biaya rendah, stabilitas kimia yang baik dan masih banyak lagi. Adapun sintesis nanokomposit TiO₂/Fe₃O₄ dibuat dengan menggunakan metode sol-gel, impregnasi, presipitasi dan kopresipitasi. Adapun penelitian ini fokus terhadap fotokatalis pewarna sintesis metilen biru dan metil jingga dan menggunakan TiO₂/Fe₃O₄ sebagai katalis. Beberapa parameter operasional yang dianalisis meliputi waktu reaksi, konsentrasi katalis dan konsentrasi pewarna. Hasil akhir menunjukkan bahwa nanokomposit TiO₂/Fe₃O₄ mampu mendegradasi warna metilen biru dan metil jingga dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Ahmad Fauzi, N. Imani Istiqomah, E. Kurnia Sari, E. Suharyadi, and H. Aliah, "Concentration Dependences of Photocatalytic Activity in Green-Synthesis Fe₃O₄/TiO₂Nanocomposite Utilizing Moringa Oleifera for Methylene Blue Dye Degradation," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1742-6596/2696/1/012011.
- [2] I. Kustiningsih, F. Nurrahman, H. A. Rinaldi, I. E. Jumiati, D. K. Sari, and Jayanudin, "Synthesize Fe₃O₄-TiO₂ Composite for Methyl Orange Photocatalytic Degradation," in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2022, pp. 129–135. doi: 10.4028/p-9q4ts9.
- [3] R. Hatefi, H. Younesi, A. Mashinchian-Moradi, and S. Nojavan, "A facile decoration of anatase Fe₃O₄/TiO₂ nanocomposite with graphene quantum dots: Synthesis, characterization, and photocatalytic activity," *Advanced Powder Technology*, vol. 32, no. 7, pp. 2410–2422, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.appt.2021.05.020.
- [4] T. K. Tan, P. Khiew, W. Chiu, and C. Chia, "Magnetised photocatalyst TiO₂/Fe₃O₄ nanocomposite capable to photodegrade organic dye," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/744/1/012021.
- [5] N. Behravesht *et al.*, "Efficient photocatalysis activation for reactive red 195 degradation by magnetic MIL-53(Fe)/Fe₃O₄@TiO₂ hybrid nanocomposite," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 285, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.117057.
- [6] D. Yanto Rahman and R. Sulistyowati, "Environmental Science Journal (ESJo): Jurnal Ilmu Lingkungan APLIKASI FOTOKATALIS TIO₂ DAN ALTERNATIFNYA UNTUK DEGRADASI PEWARNA SINTETIS DALAM LIMBAH CAIR," 2023. [Online]. Available: <http://journal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/esjo>
- [7] A. Rizky Pradipta *et al.*, "Sintesis Nanokomposit Fe₃O₄/TiO₂ Sebagai Fotokatalis yang Dapat Diambil Kembali Dalam Fotoreduksi Limbah Ion Perak(I)," 2021.
- [8] M. Gebrezgiabher *et al.*, "A c-doped tio₂/fe₃o₄ nanocomposite for photocatalytic dye degradation under natural sunlight irradiation," *Journal of Composites Science*, vol. 3, no. 3, 2019, doi: 10.3390/jcs3030075.
- [9] S. Wardiyati *et al.*, "Pengaruh Penambahan SiO₂ ... Siti Wardiyati dkk PENGARUH PENAMBAHAN SiO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK DAN KINERJA FOTOKATALITIK Fe₃O₄/TiO₂ PADA DEGRADASI METHYLENE BLUE (THE SiO₂ ADDITION EFFECT TO Fe₃O₄/TiO₂ PHOTOCATALYTIC CHARACTERISTIC AND PERFORMANCE ON METHYLENE BLUE DEGRADATION)."
- [10] S. Moosavi *et al.*, "Methylene blue dye photocatalytic degradation over synthesised fe₃ o₄ /ac/tio₂ nano-catalyst: Degradation and reusability studies," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 12, pp. 1–15, Dec. 2020, doi: 10.3390/nano10122360.
- [11] S. Sunaryono *et al.*, "The effect of Fe₃O₄concentration to photocatalytic activity of Fe₃O₄@TiO₂-PVP core-shell nanocomposite," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Aug. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1595/1/012003.
- [12] K. Tedsree, N. Temnuch, N. Sriplai, and S. Pinitsoontorn, "Ag modified Fe₃O₄@TiO₂ magnetic core-shell nanocomposites for photocatalytic degradation of methylene blue," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 6576–6584. doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.170.
- [13] A. H. Kianfar and M. A. Arayesh, "Synthesis, characterization and investigation of photocatalytic and catalytic

- applications of Fe₃O₄/TiO₂/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.
- [14] S. T. Almutairi, “Fabrication and catalytic activity of TiO₂/Fe₃O₄ and Fe₃O₄/β-cyclodextrin nanocatalysts for safe treatment of industrial wastewater,” *Heliyon*, vol. 10, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35400.
- [15] C. W. Kartikowati *et al.*, “Synthesis of TiO₂/Fe₂O₃ Nanocomposites as Photocatalyst for Methyl Orange Degradation,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Jan. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202448103008.
- [16] L. Gnanasekaran *et al.*, “Nanosized Fe₃O₄ incorporated on a TiO₂ surface for the enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants,” *J Mol Liq*, vol. 287, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.molliq.2019.110967.
- [17] E. Sri Kunarti, I. Kartini, A. Syoufian, and K. M. Widyandari, “Synthesis and photoactivity of Fe₃O₄/TiO₂-Co as a magnetically separable Visible light responsive photocatalyst,” *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 18, no. 3, pp. 403–410, Aug. 2018, doi: 10.22146/ijc.26831.
- [18] N. I. Mohd Razip, K. M. Lee, C. W. Lai, and B. H. Ong, “Recoverability of Fe₃O₄/TiO₂ nanocatalyst in methyl orange degradation,” *Mater Res Express*, vol. 6, no. 7, Apr. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab176e.
- [19] A. Listanti, A. Taufiq, A. Hidayat, and S. Sunaryono, “Investigasi Struktur dan Energi Band Gap Partikel Nano Tio₂ Hasil Sintesis Menggunakan Metode Sol-Gel,” *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)*, vol. 3, no. 1, pp. 8–15, Apr. 2018, doi: 10.17977/um024v3i12018p008.
- [20] Y. M. Liza, R. Chairani Yasin, S. S. Maidani, and R. Zainul, “a review SOL GEL : PRINCIPLE AND TECHNIQUE.”
- [21] A. Shobib, S. Muryanto, and J. Pawiyatan Luhur Bendan Duwur Semarang, “UJI ANALISA PERBANDINGAN BERAT SERBUK KAYU MANGGA (*Mangifera indica*) DAN AMPAS TEBU TERHADAP DAYA PATAH DAN DAYA ELASTIS PADA IMPREGNASI DENGAN PENAMBAHAN RESIN POLISTILENE.”
- [22] T. O. Pangestu, S. F. Damayanti, S. S. Santi, and S. Muljani, “Sintesis dan Karakterisasi Kalsium Fosfat dari Cangkang Bekicot dengan Metode Presipitasi,” *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, vol. 4, no. 2, p. 82, Aug. 2021, doi: 10.25273/cheesa.v4i2.8931.82-90.
- [23] N. Nasution, dan Aida Fitri, and P. Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sumatera Utara Medan, “SINTESIS NANOPARTIKEL TiO₂ FASA RUTILE DENGAN METODE KOPRESIPITASI,” vol. 2, no. 2, pp. 18–25, 2018.