

MINI REVIEW: SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL ZnO DAN APLIKASINYA SEBAGAI FOTOKATALIS

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZnO NANOPARTICLES FOR PHOTOCATALYST: MINI REVIEW

M. Pratsojo Setiawan¹, Noor Hindryawati^{*1,2}, Abdul Aziz^{1,2}

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

Diterbitkan: 23 April 2024

ABSTRACT

This mini review will explore the multifunctional of ZnO nanomaterials. ZnO The multifunctional ZnO nanomaterial due to its inexpensive nature, eco-friendly, structure-dependent properties, and complete mineralization of pollutants make them more efficient semiconducting photocatalysts than other materials and good UV absorption. ZnO has many applications in everyday life such as for photocatalysts, antibacterials, edible coatings, and others. Based on the literature review, ZnO material can be synthesized using sol-gel, hydrothermal, solvothermal, precipitation and coprecipitation methods. So, this article reviews the recent developments in the degradation of Methylene Blue and Rhodamine B, which are cationic dyes, by examining operational parameters such as reaction time, initial dye concentration, and catalyst concentration.

Keywords: Nanoparticles, Nano materials, Photocatalyst.

PENDAHULUAN

Nanopartikel merupakan partikel yang memiliki ukuran 1–100 nm. Secara garis besar sintesis nanopartikel dapat dilakukan dengan metode *top down* (fisika) dan metode *bottom up* (kimia). Namun, kedua metode ini menggunakan bahan kimia yang berlebihan yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, dan membutuhkan biaya yang besar untuk pembuatannya. Oleh karena itu, suatu metode alternatif dikembangkan dalam sintesis nanopartikel atau nanomaterial berdasarkan konsep *green chemistry* yaitu metode *green synthesis* [1].

Fotokatalisis adalah cara luar biasa untuk membersihkan air limbah, limbah industri, dan lingkungan kita secara umum. Seseorang dapat mengurangi polusi di udara dan air dengan memodifikasi dan mengembangkan lebih lanjut teknologi ini. Hal ini juga dapat mencegah penyebaran infeksi dan penyakit seperti sindrom pernapasan akut parah (SARS). Cara hidup yang lebih bersih ini akan bermanfaat bagi semua orang di seluruh dunia. Fotokatalis yang baik harus bersifat fotoaktif, mampu memanfaatkan sinar tampak dan/atau dekat UV, bersifat inert secara biologis dan kimia, dapat difoto, murah, dan tidak beracun. Potensi redoks lubang pita valensi fotogenerasi (VB) harus cukup positif agar semikonduktor aktif secara fotokimia sehingga dapat menghasilkan radikal $\cdot\text{OH}$ yang selanjutnya dapat mengoksidasi polutan organik [4].

ZnO (Seng Oksida) merupakan material yang unik karena memiliki energi gap sebesar 3,37 eV dan energi ikat eksitasi 60 meV. Salah satu ciri khas dari ZnO adalah senyawa kimianya yang dapat berpadu dengan senyawa lain. ZnO adalah kristal yang banyak dipakai dalam berbagai keperluan, sebagai katalis atau pendukung katalis, atau sebagai semikonduktor. Karakteristik kristal ZnO tergantung pada ukuran dan metode preparasinya [14].

METODOLOGI PENELITIAN

Pada mini review ini dilakukan pencarian artikel yang relevan berbasis elektronik yaitu Science Direct .

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](#) license.



kriteria artikel yang memenuhi syarat adalah artikel penelitian yang membahas tentang sintesis dan karakteristik nanopartikel ZnO dengan berbagai metode untuk menghasilkan nano yang paling optimal bagi fotokatalisis. Pencarian artikel menghasilkan 10 artikel yang sesuai dengan topik yang akan direview.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel ZnO

Setelah dilakukan pencarian artikel, diperoleh 10 jurnal yang sesuai dengan kriteria yaitu artikel yang membahas tentang sintesis dan karakteristik nanopartikel ZnO untuk aplikasi fotokatalisis dengan berbagai metode serta aplikasinya. Berdasarkan **Tabel 1**, 10 jurnal yang diperoleh diterbitkan pada rentang tahun 2016 hingga 2023. Artikel paling banyak terbit pada tahun 2023.

Tabel 1. Informasi Umum

Tahun	Metode	Aplikasi	Nama Penulis
2019	Presipitasi	Fotokatalis	(Alcaraz <i>et al</i>)
2023	Presipitasi	Fotokatalis	(Murugadoss)
2023	Green sintesis	Fotokatalis	(Nursalam)
2016	Co-Presipitasi	Fotokatalis	(Akir)
2021	Green Sintesis	Fotokatalis	(Rajendrachari)
2021	Green Sintesis	Fotokatalis	(Ahmad)
2023	Co-precipitation	Fotokatalis	(Singh)
2022	Green Sintesis	Fotokatalis dan antibakteri	(Kamarajan, Anburaj)
2023	Sol-gel	Fotokatalis	(Lal)
2021	Sol-gel	Fotokatalis	(Dodoo-Arhin)

Dilihat dari **Tabel 1**, metode yang digunakan dalam mensintesis nanopartikel ZnO ialah metode sol-gel, green sintesis, presipitasi [8,7] dan *co-presipitasi*. Masing-masing metode memiliki kelebihan yaitu metode sol-gel (Keunggulan metode sol-gel antara lain: rendemen tinggi, suhu operasi rendah, dan biaya produksi rendah. Terlebih lagi, sintesis sol-gel menghasilkan ciri-ciri unik, yaitu kemungkinan pengendalian sifat fisiko-kimia senyawa yang dihasilkan melalui variasi parameter yang mempengaruhi berbagai tahap sintesis [18] *co-precipitation* memiliki keunggulan kemurnian produk yang tinggi, ukuran partikel yang mudah dikontrol, suhu rendah, efisiensi energi, reproduktifitas, dan ramah ekonomi. Kerugiannya adalah sebagai berikut: memakan waktu dan tidak sesuai untuk spesies tak bermuatan [5]. presipitasi (memiliki keunggulan dalam pembuatannya yang sederhana dan biaya yang murah, sehingga dapat digunakan secara luas dalam produksi industri)[10].

Saat ini telah berkembang metode yang lebih ramah lingkungan yaitu *green* sintesis yang memiliki beberapa keunggulan seperti penggunaan bahan kimia yang tidak beracun, hasil sintesis meningkat secara signifikan, efisiensi energi, proses produksi lebih murah, memiliki nilai ekonomi yang baik, dan limbah yang dihasilkan relatif rendah, sehingga proses ini lebih ramah lingkungan. terhadap lingkungan [17].

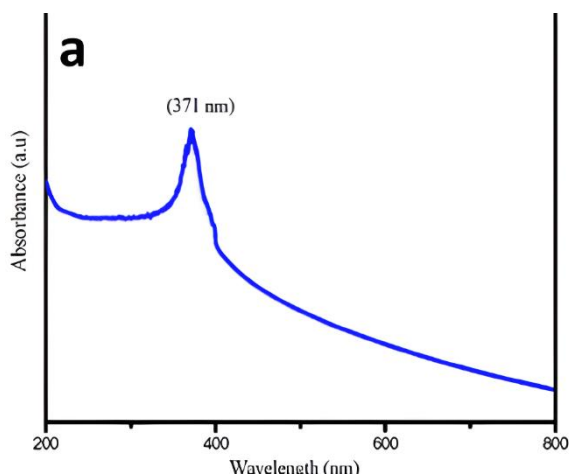
Penjelasan tentang metode *green* sintesis akan dijelaskan lebih lanjut. [2]: Artikel ini menggunakan *green synthesis* untuk sintesis ZnO nanomaterial dengan bentuk yang berbeda. Mereka berhasil mencapai efisiensi degradasi yang baik terutama untuk Rhodamine B. Hasil ini menunjukkan bahwa *green synthesis* dapat menghasilkan ZnO nanomaterial dengan kinerja yang baik sebagai fotokatalis. [13] melakukan penelitian dengan menggabungkan metode *green synthesis* dengan penggunaan *cauliflower shaped ZnO nanoparticles*. Mereka mencapai efisiensi degradasi yang baik untuk Rhodamine B dan melakukan studi tentang penghambatan enzim. Ini menunjukkan bahwa ZnO nanomaterial dapat digunakan dalam berbagai aplikasi.

Untuk mengetahui lebih dalam tentang pembuatan nanopartikel ZnO maka penulis mengumpulkan informasi terkait penggunaan bahan dalam sintesis yang dapat dilihat pada tabel 2. Berdasarkan **Tabel.2**, bahan yang paling sering digunakan pada penelitian sintesis nanopartikel ZnO ialah prekursor ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), namun terdapat beberapa penelitian yang menggunakan prekursor $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, terdapat pula prekursor lain yaitu ZnCl_2 . Pelarut yang paling sering digunakan ialah air demineralisasi. Sedangkan untuk katalis hampir semua referensi menggunakan katalis NaOH kecuali penelitian (Lal) yang menggunakan KOH, (Dodoo-Arhin) yang menggunakan *Oxalic acid-ethanol*, dan (Ahmad) yang menggunakan $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Sehingga dapat disimpulkan bahan yang paling sering digunakan ialah prekursor ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pelarut air demineralisasi, dan, katalis NaOH.

Tabel 2. Penggunaan Bahan

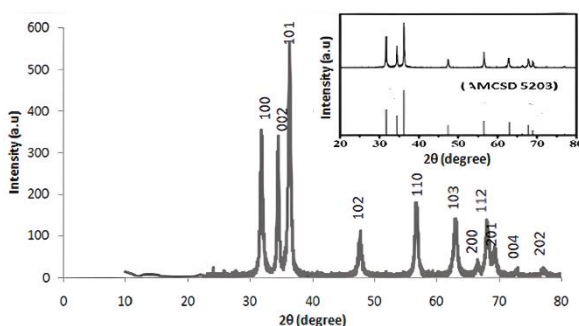
Prekursor	Pelarut	Katalis	Referensi
Baterai alkali bekas	Air demineralisasi	NaOH	(Alcaraz <i>et al</i>)
$(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$	Air demineralisasi	-	(Murugadoss)
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Air demineralisasi	Ammonia	(Nursalam)
$(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$	Water	NaOH	(Akir)
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	air demineralisasi	NaOH	(Rajendrachari)
ZnCl_2	Air demineralisasi	$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	(Ahmad)
$(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$	Ekstrak Beetroot	-	(Singh)
$(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$	Air demineralisasi	NaOH	(Kamarajan, Anburaj)
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Isopropanol	KOH	(Lal)
$(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$	Etanol	Oxalic acid-ethanol	(Dodoo-Arhin)

Berdasarkan tabel 2 pula diperoleh beberapa hasil karakterisasi ZnO nanopartikel yang dapat dilihat pada Gambar 1, 3 dan 3.



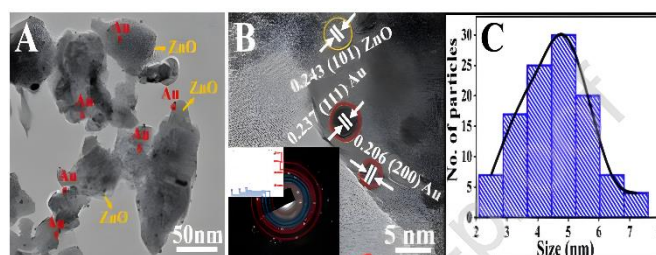
Gambar 1. Gambar Spektra UV-Vis Spectra Nanopartikel ZnO [7].

Berdasarkan penelitian [7], nanopartikel ZnO diuji pada panjang gelombang 200-800 nm. Menghasilkan nanopartikel menyerap pada panjang gelombang 371 nm.



Gambar 2. Gambar data XRD Nanopartikel ZnO [14].

Berdasarkan penelitian [14] pada analisis XRD menunjukkan struktur wurtzite kristal ZnO fase heksagonal sesuai dengan American Mineralogist Crystal Structure Database no. 5203 [27]. Puncak difraksi terletak pada $31,88^\circ$ (100), $34,54^\circ$ (002), $36,40^\circ$ (101), $47,74^\circ$ (102), $56,60^\circ$ (110), $63,10^\circ$ (103), $66,70^\circ$ (200), $68,00^\circ$ (112), $69,16^\circ$ (201), $72,9^\circ$ (004) dan $77,2^\circ$.



Gambar 3. TEM dari Nanopartikel ZnO [1].

Berdasarkan penelitian [1], pada analisis TEM menunjukkan terbentuknya nanopartikel ZnO dengan ukuran 50 nm.

B. Penggunaan ZnO Sebagai Katalis dalam Fotodegradasi zat warna

Berdasarkan **Tabel.3**, pewarna yang paling sering digunakan pada penelitian sintesis nanopartikel ZnO ialah pewarna Rhodamine B. Jenis cahaya paling banyak digunakan adalah lampu UV. Konsentrasi optimum dari semua jurnal adalah 10 mg konsentrasi pewarna dengan waktu 40 menit dan 0.01 gram katalis dengan efisiensi degradasi sebesar 100% untuk senyawa Metilen Blue sedangkan untuk pewarna Rhodamine B dengan efisiensi degradasi sebesar 95.41% dengan konsentrasi pewarna sebanyak 0.01 gram selama 160% dengan konsentrasi katalis sebesar 0.1 gram.

Selanjutnya akan dibahas lebih detail aktivitas fotokatalitik ZnO. Pada penelitian [3], artikel ini menggunakan metode presipitasi untuk sintesis ZnO nanomaterial dan mencapai efisiensi degradasi sekitar 93% untuk Methylene Blue (MB) dan 90% untuk Rhodamine B (RhB) menggunakan sinar UV. Hal ini menunjukkan potensi ZnO dalam menghilangkan pewarna kation.

Tabel 3. Fotokatalis

Konsentrasi Pewarna	Efisiensi Degradasi (%)	Jenis Cahaya	Waktu (Menit)	Katalis	Pewarna
2.5 mg	93 MB/ 90 RhB	UV	60/195	5 mg	Methylene Blue, Rhodamine B
20 ppm	94.1	Visible (Sunlight)	120	25 mg	Crystal Violet
5 ppm	85.82	UV	170	0.01 g	Metilen Blue
10 ppm	84	Visible (Lamp)	160	1 mg	Rhodamine B
10 mg	75	UV	160	40 mg	Rhodamine B
10 ppm	95	UV	180	0.03 g	Rhodamine B
10 mg	100 MB/55.2 RhB	Visible (Sunlight)	40/20	0.01 g	Methylene Blue, Rhodamine B
50 ppm	96	Visible (Sunlight)	90	100 mg	Metilen Blue
2g	95	UV	70	25 mg	Rhodamine B
0.01	95.41	UV	160	0.1 g	Rhodamine B

Selanjutnya [11] menggunakan metode presipitasi untuk sintesis ZnO nanomaterial, tetapi dengan peningkatan efisiensi degradasi menggunakan nanomaterial ZnO yang modifikasi dengan nanopartikel berbasis sulfida. Efisiensi degradasi diperoleh hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

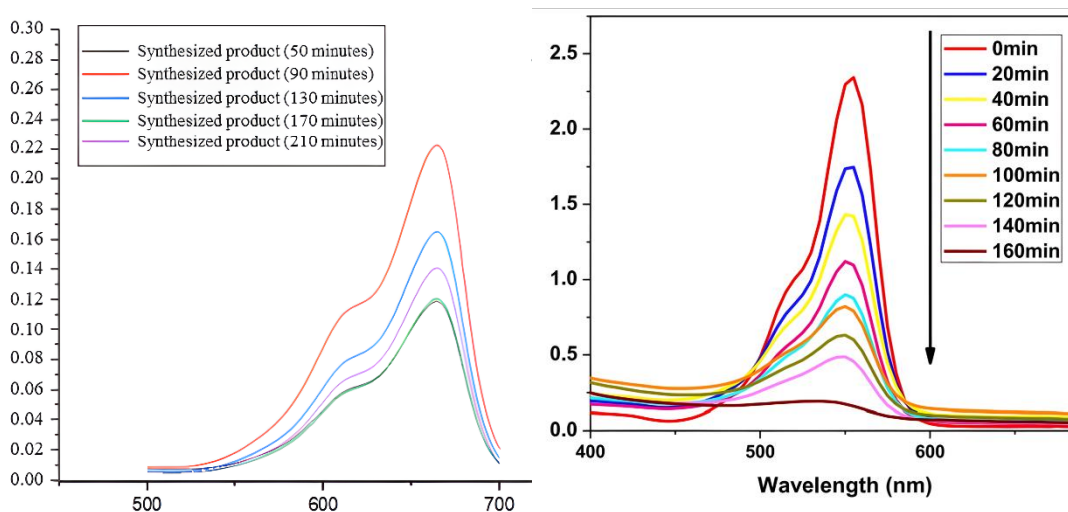
[12] mengeksplorasi penggunaan *microwave assistance* dalam sintesis ZnO nanomaterial dan mencapai efisiensi degradasi sekitar 95% untuk Methylene Blue menggunakan sinar UV. Ini menunjukkan bahwa metode sintesis yang inovatif dapat meningkatkan efisiensi fotokatalisis.

[1] melakukan penelitian pada sintesis ZnO nanomaterial dengan pendekatan fitogenik menggunakan ekstrak daun *Acalypha indica*. Mereka mencapai hasil yang menjanjikan dalam fotokatalisis dan penghambatan bakteri. Ini menunjukkan bahwa metode fitogenik dapat digunakan untuk mendapatkan nanomaterial ZnO yang berkualitas tinggi. [15] menekankan pada bio-genic synthesis dari nanomaterial ZnO

menggunakan ekstrak beetroot. Mereka mencapai hasil yang menarik dalam penguraian pewarna Rhodamine B dan Methylene Blue. Hal ini menunjukkan bahwa nanomaterial ZnO dapat disintesis dengan pendekatan berbasis tanaman. Didapatkan konsentrasi pewarna dengan waktu 40 menit dan 0.01 gram katalis dengan efisiensi degradasi sebesar 100% untuk senyawa Metilen Blue.

Selanjutnya, [8] menggunakan pendekatan fitogenik dengan ekstrak daun *Acalypha indica*. Mereka berhasil menghasilkan ZnO nanomaterial dan menunjukkan efisiensi yang baik dalam fotokatalisis dan sebagai agen antibakteri.

[9] menggunakan metode *sol-gel mediated ultrasonic hydrothermal* untuk mensintesis ZnO *nanoparticles* dan mencapai hasil yang baik dalam penguraian pewarna Rhodamine B. Metode ini menunjukkan potensi dalam pengembangan nanomaterial ZnO dengan efisiensi fotokatalisis yang tinggi. Kemudian, [6] mengeksplorasi penggunaan ZnO *nanoparticles* dalam penguraian pewarna Rhodamine B. Mereka mencapai hasil yang menarik dalam fotokatalisis yaitu pewarna Rhodamine B dengan efisiensi degradasi sebesar 95.41% dengan konsentrasi pewarna sebanyak 0.01 gram selama 160% dengan konsentrasi katalis sebesar 0.1 gram paling tinggi di antara jurnal lain.



Gambar 4. % Degradasi dari MB dan Rhodamine B

Dengan demikian, penelitian ini memberikan wawasan tentang penggunaan ZnO sebagai fotokatalis untuk menguraikan pewarna kation, dengan penekanan pada pengaruh parameter operasional pada efisiensi degradasi. Potensial ZnO sebagai fotokatalis dalam mengatasi polusi lingkungan dan aplikasi lainnya menjadi jelas dalam konteks penelitian ini.

KESIMPULAN

Dalam mini review ini, telah dijelaskan tentang multifungsi nanomaterial ZnO yang memiliki banyak keunggulan, seperti biaya yang ekonomis, ramah lingkungan, sifat tergantung struktur, dan kemampuan untuk menghilangkan polutan. ZnO juga memiliki berbagai aplikasi dalam kehidupan sehari-hari, termasuk sebagai fotokatalis, antibakteri, dan lapisan edible. Sintesis ZnO dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk *sol-gel*, *hydrothermal*, *solvothermal*, presipitasi, dan *co-precipitation*. Penelitian ini lebih fokus pada penguraian dua pewarna kation, Methylene Blue dan Rhodamin B, menggunakan ZnO sebagai katalis. Beberapa parameter operasional yang dianalisis meliputi waktu reaksi, pH, konsentrasi awal pewarna, dan konsentrasi katalis. Hasilnya menunjukkan bahwa katalis ZnO sangat efektif dalam menguraikan pewarna-pewarna ini, dengan beberapa kondisi optimal yang telah diidentifikasi. Dalam penelitian ini, bahan baku yang umum digunakan adalah prekursor $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dengan pelarut utama adalah air demineralisasi, dan katalis NaOH. Metode sintesis yang digunakan meliputi *sol-gel*, *green synthesis*, presipitasi, dan *coprecipitation*. Jenis cahaya paling banyak digunakan adalah lampu UV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad, M., Rehman, W., Khan, M. M., Qureshi, M. T., Gul, A., Haq, S., Ullah, R., Rab, A., & Menaa, F. (2021). Phytogenic fabrication of ZnO and gold decorated ZnO nanoparticles for

- photocatalytic degradation of Rhodamine B. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104725. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104725>
- [2] Akir, S., Barras, A., Coffinier, Y., Bououdina, M., Boukherroub, R., & Omrani, A. D. (2016). Eco-friendly synthesis of ZnO nanoparticles with different morphologies and their visible light photocatalytic performance for the degradation of Rhodamine B. *Ceramics International*, 42(8), 10259–10265. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.153>
 - [3] Alcaraz, L., García-Díaz, I., González, L., Rabanal, M. E., Urbieto, A., Fernández, P., & López, F. A. (2019). New photocatalytic materials obtained from the recycling of alkaline and Zn/C spent batteries. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2809–2818. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.020>
 - [4] Ameta, R., & Ameta, C. S. (2016). Chapter 3 Binary Semiconductors. In *Photocatalysis* (pp. 17–34). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372396-4>
 - [5] Chadha, U., Bhardwaj, P., Selvaraj, S. K., Arasu, K., Praveena, S., Pavan, A., Khanna, M., Singh, P., Singh, S., Chakravorty, A., Badoni, B., Banavoth, M., Sonar, P., & Paramasivam, V. (2022). Current Trends and Future Perspectives of Nanomaterials in Food Packaging Application. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 1–32. <https://doi.org/10.1155/2022/2745416>
 - [6] Dodoo-Arhin, D., Asiedu, T., Agyei-Tuffour, B., Nyankson, E., Obada, D., & Mwabora, J. M. (2021). Photocatalytic degradation of Rhodamine dyes using zinc oxide nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 38, 809–815. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.597>
 - [7] Kamarajan, G., Anburaj, D. B., Porkalai, V., Muthuvel, A., & Nedunchezian, G. (2022). Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Acalypha indica* leaf extract and their photocatalyst degradation and antibacterial activity. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(10), 100695. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100695>
 - [8] Kamarajan, G., Benny Anburaj, D., Porkalai, V., Muthuvel, A., Nedunchezian, G., & Mahendran, N. (2022). Green synthesis of ZnO nanoparticles and their photocatalyst degradation and antibacterial activity. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 7(2), 180–193. <https://doi.org/10.22090/jwent.2022.02.006>
 - [9] Lal, M., Sharma, P., Singh, L., & Ram, C. (2023). Photocatalytic degradation of hazardous Rhodamine B dye using sol-gel mediated ultrasonic hydrothermal synthesized of ZnO nanoparticles. *Results in Engineering*, 17, 100890. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100890>
 - [10] Li, M., Ding, K., Li, Z., & Qingxuan, Z. (2017). Direct Precipitation Method of Nano-CuO. *MATEC Web of Conferences*, 108, 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710802003>.
 - [11] Murugadoss, G., Salla, S., Kumar, M. R., Kandhasamy, N., Al Garalleh, H., Garaleh, M., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2023). Decoration of ZnO surface with tiny sulfide-based nanoparticles for improve photocatalytic degradation efficiency. *Environmental Research*, 220, 115171. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115171>.
 - [12] Nursalam, W. F., Momuat, L. I., & Aritonang, H. F. (2023). Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Microwave Assistance and Its Application as Photocatalyst in Degrading Methylene Blue. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 26(1), 28–33. <https://doi.org/10.14710/jksa.26.1.28-33>
 - [13] Rajendrachari, S., Taslimi, P., Karaoglanli, A. C., Uzun, O., Alp, E., & Jayaprakash, G. K. (2021). Photocatalytic degradation of Rhodamine B (RhB) dye in waste water and enzymatic inhibition study using cauliflower shaped ZnO nanoparticles synthesized by a novel One-pot green synthesis method. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(6), 103180. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103180>
 - [14] Romadhan, M. F., Suyatma, N. E., & Taqi, F. M. (2018). Synthesis of ZnO Nanoparticles by Precipitation Method with Their Antibacterial Effect. *Indonesian Journal of Chemistry*, 16(2), 117. <https://doi.org/10.22146/ijc.21153>
 - [15] Singh, D., Anuradha, Mathur, D., Kumar, S., Pani, B., Kumar, A., Kanojia, R., Gupta, R., & Singh, L. (2023). Bio-genic synthesis of calcium coated zinc oxide nanoparticles from beetroot extract and their photo-degradation study on methylene blue and rhodamine B. *Plant Nano Biology*, 4, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100031>.
 - [16] Taba, P., Parmitha, N. Y., & Kasim, S. (2019). Sintesis Nanopartikel Perak Menggunakan Ekstrak Daun Salam (*Syzygium polyanthum*) Sebagai Bioreduktor Dan Uji Aktivitasnya Sebagai Antioksidan. *Indo. J. Chem. Res.*, 7(1), 51–60. <https://doi.org/10.30598/ijcr.2019.7-ptb>

- [17] Ying, S., Guan, Z., Ofoegbu, P. C., Clubb, P., Rico, C., He, F., & Hong, J. (2022). Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102336. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102336>
- [18] Zhang, B., Xia, R., Yan, Y., Liu, J., & Guan, Z. (2023). Highly Transparent and Zirconia-Enhanced Sol-Gel Hybrid Coating on Polycarbonate Substrates for Self-Cleaning Applications. *Materials*, 16(8), 3138. <https://doi.org/10.3390/ma16083138>