p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 3 Tahun 2026, hal 453-463

SINTESIS KOMPOSIT PANI/ZNO BERBASIS ZNO HASIL *GREEN SYNTHESIS* MENGGUNAKAN EKSTRAK BUAH BELIMBING DAN APLIKASINYA PADA FOTODEGRADASI *CONGO RED*

[1)]Maharani Triya Velina, [2)]Nugrahani Primary Putri

[1)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: maharanitriya.22003@mhs.unesa.ac.id
[2)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nugrahaniprimary@unesa.ac.id

Abstrak

Pencemaran air akibat limbah zat warna tekstil, khususnya *Congo Red* (CR), menjadi permasalahan lingkungan memerlukan metode penanganan yang efektif dan ramah lingkungan. Meskipun penelitian telah melaporkan sintesis ZnO secara *green synthesis* maupun pembentukan komposit PANI/ZnO, kajian komposit PANI/ZnO berbasis ZnO hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak buah belimbing (*Averrhoa carambola*) untuk aplikasi fotodegradasi CR terbatas. Penelitian bertujuan mensintesis komposit PANI/ZnO berbasis ZnO hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak buah belimbing (*Averrhoa carambola*) serta mengevaluasi aktivitas fotokatalitiknya terhadap degradasi CR. ZnO disintesis melalui metode *green synthesis* dengan memanfaatkan ekstrak buah belimbing sebagai agen bioreduktor dan penstabil, dikompositkan dengan polianilin (PANI) melalui metode polimerisasi *in-situ*. Karakterisasi material dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan UV-Vis. Hasil XRD menunjukkan bahwa ZnO memiliki struktur kristal heksagonal *wurtzite* dengan kristalinitas yang baik. Sementara itu, pola difraksi komposit PANI/ZnO didominasi oleh karakteristik amorf semikristalin PANI yang ditandai oleh puncak lebar pada rentang 2θ 20°–30°, sedangkan puncak ZnO tidak terdeteksi karena kandungannya yang rendah dalam komposit. Analisis UV-Vis menunjukkan bahwa nilai energi celah pita ZnO sebesar 3,20 eV menurun menjadi 2,35 eV pada komposit PANI/ZnO. Uji fotokatalitik CR menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO memiliki aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan ZnO murni, dengan persentase degradasi mencapai 91% setelah 180 menit penyinaran UV, sedangkan ZnO hanya mencapai 84%. Hasil pembentukan komposit PANI/ZnO berhasil meningkatkan sifat optik dan aktivitas fotokatalitik material sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai fotokatalis ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna.

Kata Kunci: *Green Synthesis*, ZnO, PANI/ZnO, Fotokatalisis, *Congo Red*

Abstract

Water pollution caused by textile dye effluents, particularly Congo Red (CR), has become an environmental issue that requires effective and environmentally friendly treatment methods. Although previous studies have reported the green synthesis of ZnO and the fabrication of PANI/ZnO composites, studies on PANI/ZnO composites based on green-synthesized ZnO using starfruit (Averrhoa carambola) extract for Congo Red photocatalytic degradation remain limited. This study aimed to synthesize a PANI/ZnO composite based on ZnO prepared via green synthesis using starfruit (Averrhoa carambola) extract and to evaluate its photocatalytic activity for CR degradation. ZnO was synthesized through a green synthesis approach utilizing starfruit extract as a bioreducing and stabilizing agent, followed by composite formation with polyaniline (PANI) via the in-situ polymerization method. Material characterization was carried out using X-ray Diffraction (XRD) and UV–Visible spectroscopy. The XRD results revealed that the synthesized ZnO possessed a well-crystallized hexagonal wurtzite structure. Meanwhile, the diffraction pattern of the PANI/ZnO composite was dominated by the semi-crystalline amorphous characteristics of PANI, indicated by a broad peak in the 2θ range of approximately 20°–30°, while the characteristic ZnO peaks were not clearly observed due to the relatively low ZnO content in the composite. UV–Visible analysis showed that the band gap energy decreased from 3.20 eV for pure ZnO to 2.35 eV after the formation of the PANI/ZnO composite. Photocatalytic tests using CR solution demonstrated that the PANI/ZnO composite exhibited higher photocatalytic activity than pure ZnO, achieving approximately 91% degradation after 180 minutes of UV irradiation, whereas pure ZnO achieved only about 84% degradation. These findings indicate that the formation of the PANI/ZnO composite successfully enhanced the optical properties and photocatalytic performance of the material, highlighting its potential as an environmentally friendly photocatalyst for dye-contaminated wastewater treatment.

***Keywords**: Green Synthesis, ZnO, PANI/ZnO, Photocatalysis, Congo Red*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

I. PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan akibat limbah industri tekstil menjadi salah satu permasalahan yang terus meningkat seiring dengan perkembangan sektor industri. Limbah cair tekstil umumnya mengandung berbagai jenis zat warna sintetis yang sulit terdegradasi secara alami dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan perairan. Salah satu zat warna yang banyak digunakan dalam industri tekstil adalah Congo Red (CR), yaitu pewarna azo anionik yang memiliki struktur kimia kompleks dan stabil. Keberadaan CR dalam badan air dapat menghambat penetrasi cahaya matahari, mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik, serta bersifat toksik dan berpotensi karsinogenik bagi makhluk hidup (Haque dkk., 2021). Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif untuk menghilangkan zat warna tersebut sebelum dibuang ke lingkungan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi pencemaran zat warna, seperti adsorpsi, koagulasi-flokulasi, filtrasi membran, dan proses biologis (Wahyuni dkk., 2023). Namun, metode-metode tersebut umumnya memiliki keterbatasan, seperti menghasilkan limbah sekunder, memerlukan biaya operasional yang tinggi, atau kurang efektif untuk mendegradasi senyawa organik yang stabil (Paiu dkk., 2025). Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir adalah fotokatalisis, karena mampu mendegradasi polutan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana bahkan hingga termineralisasi menjadi karbon dioksida dan air. Proses fotokatalisis memanfaatkan material semikonduktor yang dapat menghasilkan pasangan elektron–hole ketika disinari cahaya, sehingga memicu pembentukan spesies oksidatif reaktif yang berperan dalam degradasi polutan (Liu dkk., 2021).

Salah satu material semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis adalah *zinc oxide* (ZnO). Material ini memiliki sifat optik dan elektronik yang baik, tidak beracun, relatif murah, serta memiliki aktivitas fotokatalitik yang tinggi. Namun demikian, ZnO memiliki beberapa kelemahan, seperti energi celah pita yang relatif besar dan laju rekombinasi elektron–*hole* yang cukup tinggi, sehingga dapat menurunkan efisiensi fotokatalitiknya. Selain itu, metode sintesis ZnO konvensional sering kali melibatkan penggunaan bahan kimia yang berpotensi mencemari lingkungan (Raganata dkk., 2019; Sridhar dkk., 2018). Oleh karena itu, pengembangan metode sintesis yang lebih ramah lingkungan menjadi salah satu fokus penelitian saat ini, salah satunya melalui pendekatan green synthesis yang memanfaatkan ekstrak tumbuhan sebagai agen pereduksi dan penstabil.

Buah belimbing (*Averrhoa carambola*) diketahui mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti flavonoid, polifenol, tanin, dan vitamin C yang dapat berperan dalam proses sintesis nanopartikel secara ramah lingkungan. Pemanfaatan ekstrak buah belimbing dalam sintesis ZnO tidak hanya mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya, tetapi juga mendukung konsep keberlanjutan dalam pengembangan material fungsional (Chakraborty dkk., 2020). ZnO hasil *green synthesis* diharapkan memiliki karakteristik yang baik untuk aplikasi fotokatalisis. Meskipun demikian, peningkatan performa fotokatalitik masih diperlukan untuk memperoleh efisiensi degradasi yang lebih tinggi terhadap polutan organik seperti CR.

Salah satu strategi yang banyak dilakukan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik ZnO adalah dengan membentuk komposit dengan polimer konduktif, seperti polianilin (PANI). PANI memiliki keunggulan berupa konduktivitas listrik yang baik, stabilitas kimia yang tinggi, serta kemampuan menyerap cahaya pada rentang yang lebih luas dibandingkan ZnO. Pembentukan komposit PANI/ZnO dapat menghasilkan efek sinergis yang meningkatkan pemisahan pasangan elektron–*hole* dan menghambat rekombinasi muatan, sehingga memperbesar peluang terbentuknya spesies reaktif yang berperan dalam proses degradasi polutan. Selain itu, keberadaan PANI dapat memperluas respons cahaya material dan meningkatkan transfer muatan antarfasa, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan aktivitas fotokatalitik (Gilja dkk., 2018).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan sintesis ZnO menggunakan ekstrak tumbuhan melalui metode *green synthesis* maupun pengembangan komposit PANI/ZnO sebagai fotokatalis, sebagian besar

penelitian tersebut masih berfokus pada sintesis ZnO atau komposit secara terpisah dengan menggunakan jenis ekstrak tumbuhan yang berbeda (Anik dkk., 2025; Karam & Abdulrahman, 2022; Rizda Brilianti dkk., 2025; Silver dkk., 2023). Kajian mengenai pemanfaatan ZnO hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak buah belimbing (*Averrhoa carambola*) sebagai material dasar dalam pembentukan komposit PANI/ZnO untuk aplikasi fotodegradasi CR masih relatif terbatas terutama untuk mendegradasi pewarna CR. Selain itu, karakteristik material seperti penurunan energi celah pita, sifat optik dan peningkatan aktivitas fotokatalitik pada komposit tersebut juga belum banyak dibahas secara terpadu. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mensintesis komposit PANI/ZnO berbasis ZnO hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak buah belimbing melalui metode polimerisasi *in-situ* serta mengevaluasi aplikasinya pada proses fotodegradasi CR. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penggabungan ZnO hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak buah belimbing sebagai material semikonduktor dengan polianilin (PANI) menjadi komposit fotokatalis yang diaplikasikan untuk degradasi CR, sekaligus mengkaji keterkaitan karakteristik material dan aktivitas fotokatalitiknya. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan material fotokatalis yang ramah lingkungan, memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih baik dibandingkan ZnO murni, serta berpotensi menjadi alternatif teknologi pengolahan limbah zat warna yang efektif dan berkelanjutan.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Material fotokatalis yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas ZnO hasil *green synthesis* dan komposit PANI/ZnO. Sintesis ZnO dilakukan menggunakan ekstrak buah belimbing (*Averrhoa carambola*) sebagai agen bioreduktor dan penstabil. Buah belimbing dicuci menggunakan akuades, dipotong, kemudian dikeringkan dan digiling hingga diperoleh serbuk halus. Sebanyak 50 mg serbuk buah belimbing diekstraksi dalam 100 mL akuades pada suhu 70 °C selama 15 menit hingga menghasilkan larutan berwarna kuning muda. Larutan ekstrak kemudian didinginkan pada suhu ruang, disaring, disentrifugasi, dan supernatan yang diperoleh digunakan sebagai ekstrak buah belimbing. Larutan prekursor ZnO disiapkan dengan melarutkan $Zn(NO_3)_2$ berkonsentrasi 0,5 M dalam 50 mL akuades. Ekstrak buah belimbing kemudian ditambahkan ke dalam larutan $Zn(NO_3)_2$ dengan perbandingan volume 9:1 (ekstrak buah belimbing : larutan $Zn(NO_3)_2$) sambil diaduk secara kontinu hingga homogen. Selanjutnya, larutan NaOH 2 M ditambahkan secara tetes demi tetes hingga pH campuran mencapai 12 untuk memicu proses presipitasi. Pengadukan dilanjutkan selama 5 menit hingga terbentuk endapan berwarna putih. Endapan yang diperoleh kemudian dipisahkan melalui filtrasi, dicuci menggunakan akuades, dan dikeringkan pada suhu 100 °C. Serbuk kering selanjutnya digerus, diayak, dan dikalsinasi pada suhu 400 °C selama 3 jam untuk menghasilkan nanopartikel ZnO.

Komposit PANI/ZnO disintesis melalui metode polimerisasi *in-situ*. Sebanyak 1 mL monomer anilin dilarutkan dalam 30 mL larutan HCl 1 M dan diaduk hingga homogen. Secara terpisah, sebanyak 0,2 g ZnO hasil *green synthesis* didispersikan dalam 20 mL akuades dan disonikasi selama 10 menit untuk memperoleh dispersi yang homogen. Dispersi ZnO kemudian dicampurkan ke dalam larutan anilin dan diaduk selama 30 menit. Selanjutnya, 50 mL larutan amonium persulfat (APS) 0,25 M ditambahkan secara perlahan ke dalam campuran sambil terus diaduk. Proses polimerisasi dilanjutkan dengan pengadukan selama 4 jam pada suhu ruang, kemudian campuran didiamkan selama 24 jam untuk memastikan polimerisasi berlangsung sempurna. Endapan komposit PANI/ZnO yang terbentuk dipisahkan melalui filtrasi, kemudian dicuci menggunakan etanol dan akuades hingga bebas dari sisa reaktan yang tidak bereaksi. Endapan selanjutnya dikeringkan pada suhu 60 °C selama 24 jam, digerus, dan diayak hingga diperoleh serbuk komposit PANI/ZnO (PZ2). Serbuk ZnO dan komposit PANI/ZnO yang diperoleh kemudian digunakan untuk proses karakterisasi material dan pengujian aktivitas fotokatalitik terhadap degradasi pewarna CR.

Aktivitas fotokatalitik material ZnO dan komposit PANI/ZnO dievaluasi melalui degradasi larutan CR di bawah penyinaran sinar UV. Sebanyak 100 mg fotokatalis ditambahkan ke dalam larutan CR dengan

konsentrasi 10 ppm dan diaduk hingga homogen. Suspensi kemudian disinari menggunakan sumber sinar UV selama 180 menit. Sampel larutan diambil pada interval waktu setiap 15 menit, kemudian dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Nilai absorbansi yang diperoleh digunakan untuk menentukan konsentrasi CR pada setiap waktu penyinaran, sehingga dapat dihitung persentase degradasi dan laju degradasi fotokatalitik.

B. Variabel Operasional Penelitian

Variabel operasional dalam penelitian ini terdiri atas variabel bebas, variabel kontrol, dan variabel terikat. Variabel bebas yang digunakan adalah jenis material fotokatalis, yaitu ZnO dan komposit PANI/ZnO. Variabel kontrol meliputi jenis zat pewarna yang digunakan, konsentrasi awal larutan CR, massa fotokatalis, serta waktu penyinaran selama proses fotodegradasi yang dijaga tetap pada setiap perlakuan. Adapun variabel terikat dalam penelitian ini meliputi nilai absorbansi larutan CR setelah proses fotodegradasi, konsentrasi akhir pewarna, persentase degradasi fotokatalitik, serta laju degradasi yang diperoleh dari analisis kinetika reaksi. Variabel-variabel tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh jenis material fotokatalis terhadap efektivitas degradasi CR.

C. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengujian laboratorium terhadap material ZnO dan komposit PANI/ZnO yang telah disintesis. Karakterisasi material ZnO dan komposit PANI/ZnO dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan pendekatan *Debye-Scherrer* untuk menganalisis ukuran kristalit ZnO. Karakterisasi sifat optik material komposit dilakukan menggunakan analisis *Photoluminescence* (PL). Selain itu, dilakukan analisis sifat listrik dengan spektroskopi UV-Vis untuk menentukan nilai energi celah pita (*band gap*) menggunakan persamaan *Tauc plot*. Selain itu, aktivitas fotokatalitik material diuji melalui proses degradasi larutan CR di bawah penyinaran sinar UV. Data yang dikumpulkan meliputi spektrum XRD, nilai energi *band gap*, dan nilai absorbansi larutan CR pada berbagai waktu penyinaran yang kemudian dikonversi menjadi konsentrasi menggunakan kurva kalibrasi. Data konsentrasi tersebut digunakan untuk menghitung persentase degradasi.

D. Teknik Pengolahan Data

Data yang diperoleh melalui karakterisasi XRD material ZnO digunakan untuk menghitung ukuran kristalitnya menggunakan persamaan *Debye-Scherrer* berikut.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \tag{1}$$

Selain itu, data hasil pengujian UV-Vis diolah menggunakan metode *Tauc Plot* untuk menentukan nilai energi *band gap* masing-masing material dengan persamaan berikut.

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \tag{2}$$

Sementara itu, data absorbansi hasil pengujian fotodegradasi terlebih dahulu dikonversi menjadi konsentrasi menggunakan kurva kalibrasi larutan CR. Data konsentrasi yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung persentase degradasi fotokatalitik pada setiap waktu penyinaran menggunakan Persamaan (3).

$$\text{Degradasi } (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \tag{3}$$

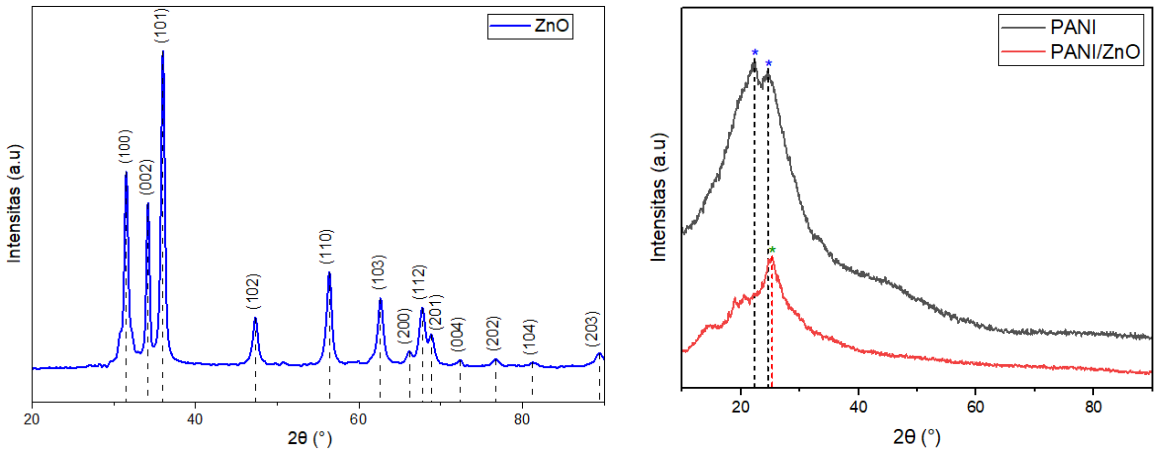
dengan C_0 merupakan konsentrasi awal larutan CR (ppm) dan C_t merupakan konsentrasi larutan CR pada waktu t (ppm). Selain menghitung persentase degradasi, data konsentrasi yang diperoleh juga digunakan untuk menganalisis kinetika reaksi fotodegradasi komposit PANI/ZnO terhadap degradasi pewarna CR menggunakan model pseudo-first-order.

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = kt \tag{4}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

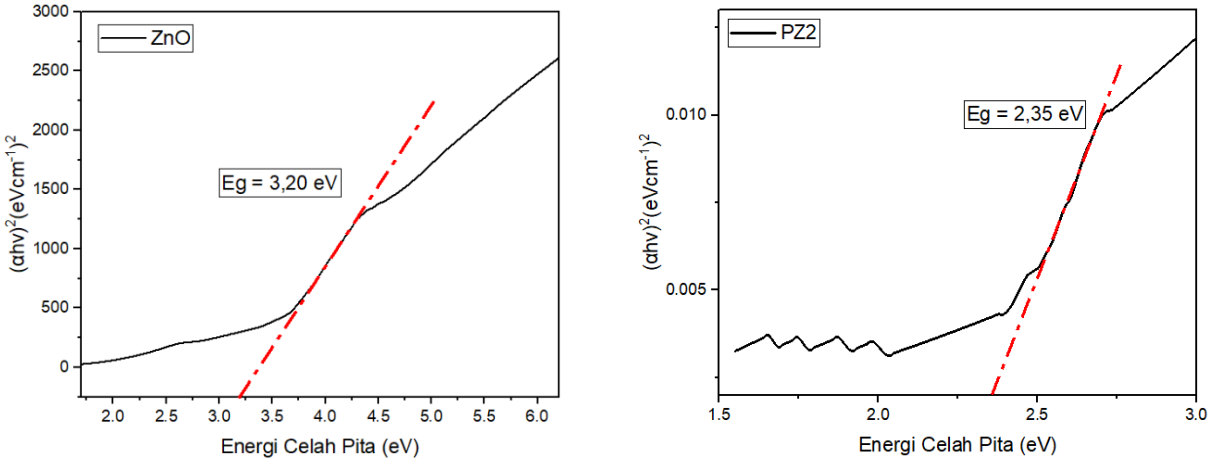
Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristal dan struktur kristal dari material ZnO hasil green synthesis menggunakan ekstrak buah belimbing serta komposit PANI/ZnO yang berhasil disintesis. Pola difraksi ZnO dan komposit PANI/ZnO ditunjukkan pada **Gambar 1(a)** dan **Gambar 1(b)**. Berdasarkan pola difraksi yang diperoleh, ZnO menunjukkan beberapa puncak difraksi utama pada rentang sudut 2θ tertentu yang mengindikasikan terbentuknya fase kristalin ZnO. Sementara itu, pola difraksi komposit PANI/ZnO menunjukkan puncak difraksi yang dominan dengan karakteristik PANI yang bersifat semi-kristalin atau *amorf*.



(a) **(b)**

Gambar 1. Pola difraksi sinar-X (XRD) (a) ZnO hasil *green synthesis* (b) komposit PANI/ZnO

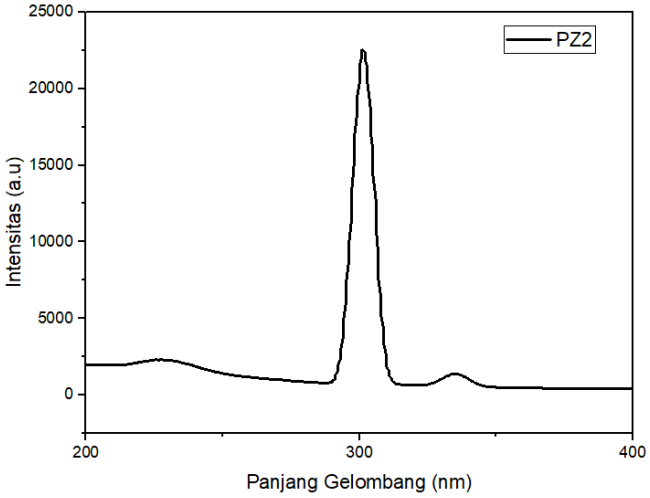
Karakterisasi UV-Vis dilakukan untuk menentukan energi *band gap* material ZnO dan komposit PANI/ZnO. Kurva *Tauc Plot* yang digunakan untuk menentukan nilai *band gap* masing-masing material. Berdasarkan hasil ekstrapolasi kurva *Tauc Plot*, diperoleh nilai energi celah pita yang berbeda pada masing-masing sampel. Nilai *band gap* yang diperoleh disajikan pada **Gambar 3(a) dan 3(b)**.



(a) **(b)**

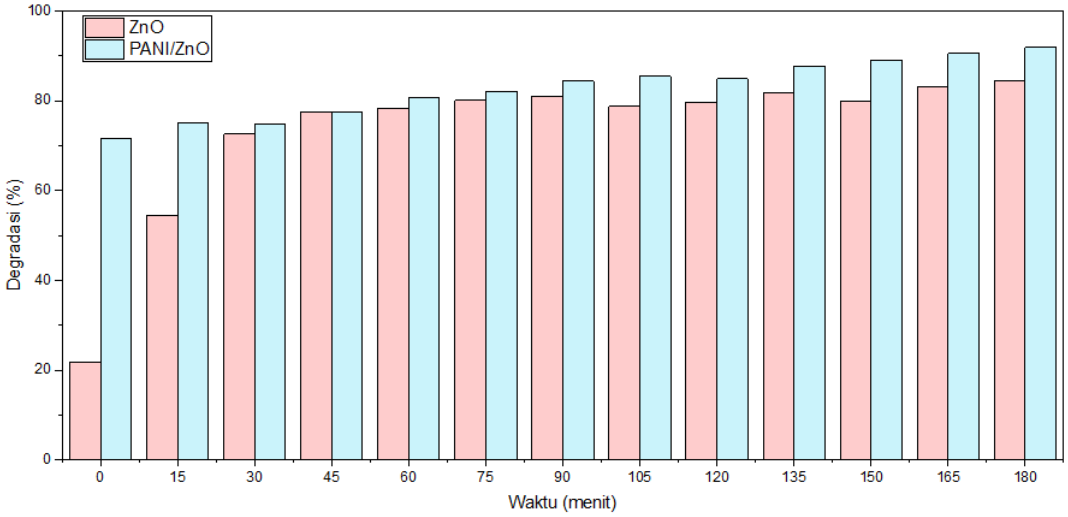
Gambar 3. Nilai energi *band gap* ZnO dan komposit PANI/ZnO

Sebelum mengevaluasi aktivitas fotokatalitik, dilakukan karakterisasi *photoluminescence* (PL) untuk mengkaji tingkat rekombinasi pasangan elektron–*hole* pada sampel komposit PANI/ZnO. Spektrum PL yang diperoleh ditunjukkan pada **Gambar 4**. Intensitas emisi PL memberikan gambaran mengenai efisiensi pemisahan muatan, di mana intensitas emisi yang lebih rendah mengindikasikan laju rekombinasi elektron–*hole* yang lebih kecil sehingga berpotensi meningkatkan aktivitas fotokatalitik.

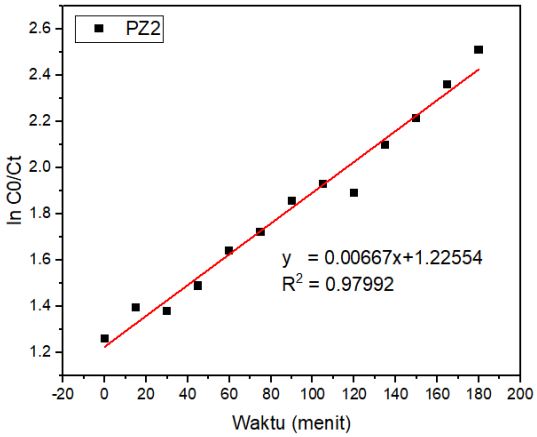


Gambar 4. *Photoluminescence* komposit PANI/ZnO

Aktivitas fotokatalitik ZnO dan komposit PANI/ZnO dievaluasi melalui degradasi larutan CR di bawah penyinaran sinar UV. Persentase degradasi yang diperoleh pada berbagai waktu penyinaran ditunjukkan pada **Gambar 5**. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sampel mengalami peningkatan persentase degradasi seiring bertambahnya waktu penyinaran.



Gambar 5. Persentase degradasi CR menggunakan ZnO dan komposit PANI/ZnO pada berbagai waktu penyinaran UV



Gambar 6. Analisis laju reaksi

Selain persentase degradasi, performa fotokatalitik juga dievaluasi berdasarkan laju degradasi menggunakan model kinetika pseudo-orde pertama. Analisis kinetika dilakukan dengan memplot nilai $\ln(C_0/C_t)$ terhadap waktu penyinaran sehingga diperoleh hubungan linear yang digunakan untuk menentukan konstanta laju reaksi (k). Grafik hubungan $\ln(C_0/C_t)$ terhadap waktu untuk masing-masing sampel ditunjukkan pada **Gambar 6**.

B. Pembahasan

Pola difraksi sinar-X (XRD) ZnO hasil sintesis hijau menggunakan ekstrak buah belimbing ditunjukkan pada **Gambar 1(a)**. Berdasarkan pola difraksi yang diperoleh, teridentifikasi beberapa puncak utama pada sudut 2θ sekitar 31,5°, 34,2°, 36,1°, 47,3°, 56,5°, 62,6°, 66,2°, 67,7°, 69,9°, 72,3°, 76,7°, dan 81,2° yang masing-masing berkaitan dengan bidang kristal seperti pada gambar. Puncak difraksi tersebut dan indeks hkl pada **Gambar 1(a)** sesuai dengan struktur kristal heksagonal *wurtzite* ZnO yang mengacu pada data standar JCPDS No. 36-1451. Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi terletak pada bidang (101), yang menunjukkan bahwa pertumbuhan kristal ZnO cenderung dominan pada arah tersebut. Analisis ukuran kristalit ZnO menggunakan Persamaan (1) menghasilkan ukuran kristalit sebesar 27,46 nm yang ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 1. Hasil identifikasi ukuran kristalit ZnO

No.	2θ	FWHM	*d-spacing* (Å)	Ukuran kristal	Ukuran rata-rata kristal (nm)
1.	31,503	0,2755	2,8399	29,9610	27,46
2.	34,184	0,1680	2,6209	49,4724	
3.	36,076	0,2640	2,4876	31,6474	
4.	47,290	0,4320	1,9206	20,0749	
5.	56,480	0,3840	1,6280	23,4834	
6.	62,598	0,2400	1,4828	38,7390	
7.	66,157	0,5760	1,4114	16,4599	
8.	67,701	0,3840	1,3829	24,9108	
9.	68,927	0,1920	1,3612	50,1846	
10.	72,337	0,4800	1,3052	20,5016	
11.	76,728	0,7680	1,2411	13,1926	
12.	81,221	0,9600	1,1834	10,9007	

Ketajaman dan intensitas puncak yang tinggi serta ukuran kristalitnya masih dalam skala nano mengindikasikan bahwa ZnO yang terbentuk memiliki tingkat kristalinitas yang baik. Selain itu, tidak terdeteksi puncak difraksi lain yang signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa material yang dihasilkan memiliki kemurnian fase yang cukup tinggi tanpa adanya fasa pengotor yang teridentifikasi. Keberhasilan pembentukan struktur *wurtzite* ZnO menunjukkan bahwa senyawa bioaktif yang terkandung dalam ekstrak buah belimbing mampu berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil selama proses sintesis. Senyawa metabolit sekunder seperti flavonoid, fenolik, dan asam organik diketahui dapat membantu pembentukan inti kristal ZnO serta mengontrol pertumbuhan partikelnya selama proses sintesis hijau (Chakraborty dkk., 2020; Swain dkk., 2025).

Pola difraksi sinar-X dari PANI dan komposit PANI/ZnO ditunjukkan pada **Gambar 1(b)**. PANI murni memperlihatkan puncak difraksi yang lebar (*broad peak*) pada daerah 2θ sekitar 25–27°, yang merupakan karakteristik struktur semi-kristalin PANI. Puncak lebar tersebut berkaitan dengan keteraturan rantai polimer dan interaksi antarrantai PANI yang masih terbatas, sehingga sebagian besar struktur material bersifat *amorf* (Ahmad dkk., 2022). Pada komposit PANI/ZnO, pola difraksi yang diperoleh masih didominasi oleh karakteristik PANI dengan puncak utama berada pada rentang sudut yang hampir sama, namun mengalami sedikit perubahan intensitas dan posisi puncak dibandingkan PANI murni. Pergeseran kecil ini mengindikasikan adanya interaksi antara rantai PANI dan partikel ZnO selama proses polimerisasi *in-situ*

(Putri dkk., 2024). Tidak tampaknya puncak-puncak difraksi khas ZnO pada pola komposit PANI/ZnO menunjukkan bahwa kandungan ZnO dalam komposit relatif rendah dibandingkan matriks polimer. Pada penelitian ini, ZnO yang ditambahkan hanya sebanyak 0,2 g sehingga intensitas difraksinya menjadi sangat kecil dan tertutupi oleh puncak lebar PANI yang lebih dominan. Selain itu, pelapisan partikel ZnO oleh rantai PANI selama proses pembentukan komposit dapat menyebabkan penurunan intensitas puncak ZnO sehingga sulit terdeteksi secara jelas pada pola XRD. Fenomena serupa juga banyak dilaporkan pada komposit PANI/ZnO dengan kandungan ZnO rendah, di mana pola difraksi komposit cenderung didominasi oleh karakteristik semi-kristalin PANI sementara puncak ZnO menjadi melemah atau bahkan tidak teramati (Shah dkk., 2020).

Karakterisasi *Photoluminescence* (PL) dilakukan untuk mengevaluasi proses rekombinasi pasangan elektron-*hole* pada komposit PANI/ZnO. Spektrum PL komposit PANI/ZnO dengan penambahan ZnO sebesar 0,2 g (PZ2) ditunjukkan pada **Gambar 4**. Spektrum memperlihatkan puncak emisi utama yang tajam pada panjang gelombang sekitar 300 nm, dengan intensitas maksimum sekitar $2{,}2 \times 10^4$ a.u. Selain itu, terlihat pita emisi yang relatif lemah pada daerah sekitar 345–355 nm yang diduga berkaitan dengan emisi akibat cacat permukaan (surface defects) atau tingkat energi perangkap pada material. Puncak emisi yang muncul merupakan hasil rekombinasi elektron pada pita konduksi dengan *hole* pada pita valensi setelah material tereksitasi oleh sumber cahaya. Keberadaan pita emisi sekunder mengindikasikan adanya cacat kristal atau kekosongan oksigen (*oxygen vacancies*) yang umum dijumpai pada material ZnO. Cacat tersebut dapat berperan sebagai pusat penjebak muatan sehingga memengaruhi proses transfer elektron selama fotokatalisis. Keberadaan PANI dalam komposit diharapkan mampu membentuk antarmuka *heterojunction* dengan ZnO sehingga memfasilitasi perpindahan elektron dari PANI menuju pita konduksi ZnO. Mekanisme ini berpotensi meningkatkan pemisahan pasangan elektron-*hole* dan memperpanjang umur muatan pembawa (*charge carriers*), sehingga lebih banyak spesies reaktif seperti radikal hidroksil (•OH) dan radikal superoksida (O_2•$^-$) yang dapat terbentuk untuk mendegradasi molekul CR (Sudhadevi dkk., 2024). Hasil karakterisasi PL ini mendukung hasil uji fotokatalitik yang menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO memiliki aktivitas degradasi yang tinggi terhadap CR.

Karakterisasi UV-Vis dilakukan untuk menentukan energi *band gap* dari ZnO dan komposit PANI/ZnO menggunakan metode *Tauc Plot*. Hasil perhitungan ditunjukkan pada **Gambar 3**. ZnO hasil sintesis memiliki nilai energi *band gap* sebesar 3,20 eV. Nilai tersebut berada pada rentang karakteristik ZnO yang umumnya dilaporkan memiliki *band gap* sekitar 3,2–3,37 eV (Mishra & Kumar, 2026). *Band gap* yang relatif besar menunjukkan bahwa ZnO memerlukan energi tinggi untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Setelah dikompositkan dengan polianilin, nilai *band gap* mengalami penurunan signifikan menjadi 2,35 eV. Penurunan ini menunjukkan bahwa keberadaan PANI berhasil memodifikasi struktur elektronik ZnO sehingga energi yang dibutuhkan untuk eksitasi elektron menjadi lebih rendah. Terbentuknya tingkat energi baru pada antarmuka PANI/ZnO memungkinkan perpindahan elektron yang lebih mudah dan memperluas daerah serapan cahaya ke wilayah panjang gelombang yang lebih besar (Qin dkk., 2018). Penurunan *band gap* ini sangat menguntungkan dalam aplikasi fotokatalitik karena memungkinkan material menyerap lebih banyak energi cahaya dan menghasilkan lebih banyak pasangan elektron-*hole* (Alardhi dkk., 2024). Dengan demikian, pembentukan spesies reaktif seperti radikal hidroksil (•OH) dan radikal superoksida (O_2•$^-$) yang berperan dalam proses degradasi polutan dapat berlangsung lebih efektif dibandingkan ZnO murni (Vijayalakshmi dkk., 2021).

Aktivitas fotokatalitik ZnO dan komposit PANI/ZnO dievaluasi melalui degradasi zat warna CR di bawah penyinaran sinar UV. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Gambar 4**. Secara umum, persentase degradasi meningkat seiring bertambahnya waktu penyinaran pada kedua sampel. Namun, pola peningkatan degradasi yang ditunjukkan oleh masing-masing material berbeda. ZnO murni memperlihatkan pola degradasi yang cenderung nonlinier, ditandai dengan peningkatan efisiensi yang lebih cepat pada tahap awal penyinaran dan kemudian melambat seiring bertambahnya waktu reaksi. Sebaliknya, komposit PANI/ZnO (PZ2) menunjukkan pola peningkatan yang lebih linier, yang mengindikasikan bahwa proses degradasi berlangsung dengan laju yang relatif konstan selama penyinaran. Pola linier pada PZ2 menunjukkan bahwa

keberadaan PANI mampu menjaga efektivitas transfer muatan dan mempertahankan pembentukan spesies reaktif secara berkelanjutan, sehingga aktivitas fotokatalitik material tetap stabil sepanjang proses degradasi. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin lama material terpapar sinar UV, semakin banyak pasangan elektron-*hole* yang dihasilkan sehingga jumlah spesies oksidatif yang terbentuk juga meningkat. ZnO murni menunjukkan kemampuan degradasi awal yang relatif rendah, yaitu sekitar 21% pada menit ke-0 dan meningkat hingga sekitar 84% setelah 180 menit penyinaran. Sementara itu, komposit PANI/ZnO menunjukkan performa yang lebih baik dengan persentase degradasi awal sekitar 71% dan mencapai sekitar 91% pada menit ke-180. Kinerja fotokatalitik yang lebih tinggi pada komposit PANI/ZnO dapat dikaitkan dengan sinergi antara PANI dan ZnO. Polianilin berperan sebagai akseptor maupun donor elektron yang mampu mempercepat pemisahan pasangan elektron-*hole* yang terbentuk selama proses fotokatalisis (Gilja dkk., 2018). Elektron yang tereksitasi dari PANI dapat ditransfer menuju pita konduksi ZnO, sedangkan *hole* tetap berada pada rantai polimer (Wang dkk., 2022). Mekanisme ini menghambat rekombinasi muatan sehingga meningkatkan jumlah spesies oksidatif aktif yang tersedia untuk mendegradasi molekul CR (Azmayesh dkk., 2024). Selain itu, hasil analisis UV-Vis menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO memiliki *band gap* yang lebih kecil dibandingkan ZnO murni. Penurunan energi *band gap* tersebut memungkinkan penyerapan energi cahaya yang lebih efektif dan mendukung peningkatan aktivitas fotokatalitik (Turkten dkk., 2021; Zor & Budak, 2020). Oleh karena itu, komposit PANI/ZnO menunjukkan efisiensi degradasi yang lebih tinggi dibandingkan ZnO hasil *green synthesis*. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pembentukan komposit PANI/ZnO berhasil meningkatkan sifat optik dan aktivitas fotokatalitik material. Kombinasi antara kristalinitas ZnO yang baik, keberadaan gugus konduktif pada PANI, serta penurunan energi *band gap* memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi degradasi zat warna CR di bawah penyinaran UV.

Analisis kinetika pada **Gambar 6** menunjukkan hubungan antara nilai $\ln(C_0/Ct)$ terhadap waktu penyinaran UV untuk sampel PZ2. Grafik memperlihatkan kecenderungan linear, yang mengindikasikan bahwa proses degradasi CR oleh komposit PZ2 mengikuti model kinetika pseudo-orde pertama. Hubungan linear tersebut dinyatakan dengan persamaan regresi **y = 0,00667x + 1,22554**, sehingga diperoleh nilai konstanta laju reaksi (k) sebesar **0,00667 menit^{-1}**. Nilai konstanta laju tersebut menunjukkan bahwa laju degradasi CR meningkat secara proporsional terhadap waktu penyinaran. Semakin besar nilai konstanta laju reaksi, semakin cepat proses degradasi berlangsung karena semakin banyak molekul zat warna yang terdegradasi dalam satuan waktu. Linearitas grafik juga menunjukkan bahwa mekanisme fotodegradasi pada sampel PZ2 sesuai dengan model kinetika pseudo-orde pertama, di mana laju reaksi bergantung pada konsentrasi zat warna yang tersisa selama proses penyinaran. Kesesuaian model kinetika tersebut diperkuat oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar **0,97992**. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa sekitar **97,99%** variasi data dapat dijelaskan oleh model regresi linear. Selain itu, sekitar 2,01% variasi lainnya kemungkinan dipengaruhi oleh perubahan jumlah situs aktif katalis selama proses fotodegradasi, rekombinasi pasangan elektron–*hole*, perubahan konsentrasi spesies reaktif seperti radikal hidroksil, serta fluktuasi intensitas penyinaran UV (Zor & Budak, 2020). Dengan demikian, nilai R^2 yang tinggi menunjukkan bahwa model kinetika pseudo-orde pertama memberikan kecocokan yang sangat baik dalam menggambarkan proses degradasi CR menggunakan komposit PZ2.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa ZnO berhasil disintesis menggunakan metode *green synthesis* dengan ekstrak buah belimbing dan memiliki struktur kristal heksagonal *wurtzite* dengan kristalinitas yang baik. Komposit PANI/ZnO berhasil dibentuk melalui metode polimerisasi *in-situ*, yang dikonfirmasi oleh penurunan energi *band gap* dari material ZnO murni. Hasil analisis UV-Vis menunjukkan bahwa pembentukan komposit PANI/ZnO menurunkan nilai energi *band gap* dari 3,20 eV menjadi 2,35 eV, yang mengindikasikan peningkatan kemampuan material dalam menyerap energi cahaya. Uji aktivitas fotokatalitik menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO memiliki performa yang lebih

baik dibandingkan ZnO murni dalam mendegradasi CR di bawah penyinaran UV, dengan efisiensi degradasi mencapai sekitar 91% setelah 180 menit penyinaran. Peningkatan aktivitas fotokatalitik tersebut dikaitkan dengan penurunan *band gap* dan meningkatnya pemisahan pasangan elektron-*hole* akibat interaksi sinergis antara PANI dan ZnO. Dengan demikian, komposit PANI/ZnO berpotensi digunakan sebagai material fotokatalis ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan penggunaan ulang (*reusability*) fotokatalis untuk mengevaluasi kinerja material dalam aplikasi jangka panjang. Pengujian terhadap berbagai jenis zat warna maupun limbah industri aktual juga diperlukan untuk mengetahui efektivitas komposit PANI/ZnO pada kondisi yang lebih kompleks. Di samping itu, penelitian lanjutan dapat mengkaji aktivitas fotokatalitik material di bawah penyinaran cahaya tampak sebagai upaya meningkatkan pemanfaatan energi surya dalam proses pengolahan limbah yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, S., Hammad, R., & Rubab, S. (2022). Gamma Radiation-Induced Synthesis of Polyaniline-Based Nanoparticles/Nanocomposites. Dalam *Journal of Electronic Materials* (Vol. 51, Nomor 10, hlm. 5550–5567). Springer. https://doi.org/10.1007/s11664-022-09823-0

Alardhi, S. M., Abdalsalam, A. H., Ati, A. A., Abdulkareem, M. H., Ramadhan, A. A., Taki, M. M., & Abbas, Z. Y. (2024). Fabrication of Polyaniline/Zinc Oxide Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Adsorption of Methylene Orange. *Polymer Bulletin*, *81*(2), 1131–1157. https://doi.org/10.1007/s00289-023-04753-1

Anik, A. B., Hossen Akash, M., Alam, M. A., Alam, M. Z., Sarker, D., & Sultana, N. (2025). Green Synthesis of ZnO Nanoparticles Using Justicia adhatoda for Effective Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye. *RSC Advances*, *15*(54), 45874–45888. https://doi.org/10.1039/d5ra06656e

Azmayesh, R., Naghshara, H., Mohammadi Aref, S., & Ghafouri, M. (2024). Preparation of a Polyaniline/ZnO-NPs Composite for the Visible-Light-Driven Hydrogen Generation. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-53672-2

Chakraborty, S., Farida, J. J., Simon, R., Kasthuri, S., & Mary, N. L. (2020). Averrhoe Carrambola Fruit Extract Assisted Green Synthesis of ZnO Nanoparticles for the Photodegradation of Congo Red Dye. *Surfaces and Interfaces*, *19*. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100488

Gilja, V., Vrban, I., Mandić, V., Žic, M., & Hrnjak-Murgić, Z. (2018). Preparation of a PANI/ZnO composite for efficient photocatalytic degradation of acid blue. *Polymers*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/polym10090940

Haque, M. M., Haque, M. A., Mosharaf, M. K., & Marcus, P. K. (2021). Novel Bacterial Biofilm Consortia That Degrade and Detoxify the Carcinogenic Diazo Dye Congo Red. *Archives of Microbiology 2020 203:2*, *203*(2), 643–654. https://doi.org/10.1007/s00203-020-02044-1

Karam, S. T., & Abdulrahman, A. F. (2022). Green Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles by Using Thyme Plant Leaf Extract. *Photonics*, *9*(8). https://doi.org/10.3390/photonics9080594

Liu, S., Su, Z. L., Liu, Y., Yi, L. Y., Chen, Z. L., & Liu, Z. Z. (2021). Mechanism and Purification Effect of Photocatalytic Wastewater Treatment Using Graphene Oxide-Doped Titanium Dioxide Composite Nanomaterials. *Water (Switzerland)*, *13*(14). https://doi.org/10.3390/w13141915

Mishra, M., & Kumar, M. (2026). Advances in Zinc Oxide Nanomaterials and Nanocomposites for Photocatalytic and Biomedical Applications. *Discover Materials*. https://doi.org/10.1007/s43939-025-00463-9

Paiu, M., Lutic, D., Favier, L., & Gavrilescu, M. (2025). Heterogeneous Photocatalysis for Advanced Water Treatment: Materials, Mechanisms, Reactor Configurations, and Emerging Applications. Dalam *Applied*

Sciences (Switzerland) (Vol. 15, Nomor 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/app15105681

Putri, N. P., Komariyah, A. Y., Prasya, I. S., & Fitriana, F. (2024). Investigation of PANI/ZnO Nanocomposite for Alcohol Vapor Sensor. *EUREKA, Physics and Engineering*, (6), 142–150. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003364

Qin, R., Hao, L., Liu, Y., & Zhang, Y. (2018). Polyaniline-ZnO Hybrid Nanocomposites with Enhanced Photocatalytic and Electrochemical Performance. *ChemistrySelect*, *3*(23), 6286–6293. https://doi.org/10.1002/slct.201800246

Raganata, T. C., Aritonang, H., & Suryanto, D. E. (2019). Sintesis Fotokatalis Nanopartikel ZnO untuk Mendegradasi Zat Warna Methylene Blue. *Chem. Prog*, *12*(2), 54. https://doi.org/10.35799/cp.12.2.2019.27755

Rizda Brilianti, M., Putri Purnamasari, A., Fitonna Ridassepri, A., & Kartika Maharani, D. (2025). GREEN SYNTHESIS OF ZNO NANOPARTICLES FROM LEAF EXTRACT OF Terminalia catappa AND ITS APPLICATION AS PHOTOCATALYST. Dalam *PLANT NANOMATERIALS JOURNAL Plant Nanomater J* (Vol. 1, Nomor 1). http://doi.org/xxxxxxxx

Shah, M., Khan, N., Imran, Z., Khan, M., Khattak, A., Khan, A., & Ullah, N. (2020). Structural, Optical and Impedance Spectroscopy Study of Thin Film of Polyaniline (PANI/ZnO) Nanocomposite. *Materials Research Express*, *7*(1). https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5d7e

Silver, J., Lubis, S., & Ramli, M. (2023). Green Synthesis, Characterization, and Photocatalytic Activity of Zinc Oxide Nanoparticles on Photodegradation of Naphthol Blue Black Dye. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, *26*(9), 363–371. https://doi.org/10.14710/jksa.26.9.363-371

Sridhar, R., Ramanane, U. U., & Rajasimman, M. (2018). ZnO Nanoparticles – Synthesis, Characterization and its Application for Phenol Removal from Synthetic and Pharmaceutical Industry Wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, *10*, 388–393. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.09.003

Sudhadevi, D., Jayamurugan, P., Srinivas, G., Suresh, B., Gupta, A., Rajeshkumar, R., Mohd, U., Al-Kahtani, A. A., & Kumar, A. (2024). An in vitro cytotoxicity study on PANI/ZnO nanocomposites against HCT-116 cancer cells using MTT assay. *Polymers and Polymer Composites*, *32*. https://doi.org/10.1177/09673911241288320

Swain, M., Mishra, D., & Sahoo, G. (2025). A review on green synthesis of ZnO nanoparticles. Dalam *Discover Applied Sciences* (Vol. 7, Nomor 9). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06957-8

Turkten, N., Karatas, Y., & Bekbolet, M. (2021). Preparation of pani modified zno composites via different methods: Structural, morphological and photocatalytic properties. *Water (Switzerland)*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/w13081025

Vijayalakshmi, S., Kumar, E., Ganeshbabu, M., Venkatesh, P. S., & Rathnakumar, K. (2021). Structural, electrical, and photocatalytic investigations of PANI/ZnO nanocomposites. *Ionics*, *27*(7). https://doi.org/10.1007/s11581-021-04041-w

Wahyuni, D., Nurhasanah, N., Nurhanisa, M., & Mariani. (2023). Kinerja Fotokatalis Tunggal ZnO dan Komposit ZnO/Reduced Graphene Oxide (ZnO/rGO) di bawah Iradiasi Sinar Matahari untuk Mendegradasi Metilen Biru. *Phi: Jurnal Pendidikan Fisika dan Fisika Terapan*, *9*(1), 15–20.

Wang, H., Li, X., Zhao, X., Li, C., Song, X., Zhang, P., & Huo, P. (2022). A Review on Heterogeneous Photocatalysis for Environmental Remediation: From Semiconductors to Modification Strategies. Dalam *Chinese Journal of Catalysis* (Vol. 43, Nomor 2, hlm. 178–214). Science Press. https://doi.org/10.1016/S1872-2067(21)63910-4

Zor, S., & Budak, B. (2020). Photocatalytic Degradation of Congo Red by using PANI and PANI/ZrO2: Under UV-A Light Irradiation and Dark Environment. *Desalination and Water Treatment*, *201*, 420–430. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26065