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 410-419

REUSABILITAS KOMPOSIT PANI/ZnO PADA PROSES FOTODEGRADASI *METHYLENE BLUE*

[1)]Mochammad Nor Rizal Kurniawan, [2)]Nugrahani Primary Putri, [3)] Evi Suaebah

[1)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: mochammad.22032@mhs.unesa.ac.id
[2)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nugrahaniprimary@unesa.ac.id
[3)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: evisuaebah@unesa.ac.id

Abstrak

Limbah cair industri tekstil yang mengandung pewarna toksik seperti *methylene blue* merupakan masalah lingkungan yang memerlukan penanganan efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi kinerja dan reusabilitas komposit PANI/ZnO dalam mendegradasi *methylene blue* di bawah penyinaran cahaya tampak. Fabrikasi komposit dilakukan melalui metode *green synthesis* ZnO menggunakan ekstrak kulit nanas sebagai bioreduktor, dilanjutkan dengan polimerisasi in-situ untuk menggabungkan PANI. Karakterisasi material dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan spektrofotometri UV-Vis. Hasil XRD mengonfirmasi terbentuknya fase dominan ZnO wurtzite heksagonal yang berpadu dengan struktur semikristalin PANI tanpa merusak struktur kristal utama. Analisis UV-Vis menunjukkan bahwa sampel komposit PANI/ZnO (PZ5 dengan massa ZnO 0,5 gram) memiliki nilai energi celah pita (*band gap*) sebesar 2,52 eV, jauh lebih rendah dibandingkan ZnO murni yang sebesar 3,23 eV. Penurunan *band gap* ini meningkatkan kemampuan material dalam memanfaatkan spektrum cahaya tampak. Pada uji aktivitas fotokatalitik, komposit PZ5 mampu mendegradasi 87% *methylene blue* dalam waktu 90 menit. Selain itu, evaluasi reusabilitas selama tiga kali menunjukkan stabilitas yang baik, dengan penurunan efisiensi degradasi hanya sebesar 2,20% pada *reusability* ketiga. Oleh karena itu, komposit PANI/ZnO terbukti sebagai fotokatalis alternatif yang efisien, stabil, dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Fotodegradasi, *Methylene blue*, Komposit PANI/ZnO, *Green Synthesis*, Reusabilitas.

Abstract

Textile industry wastewater containing toxic dyes such as methylene blue is an environmental problem that requires effective management. This study aims to investigate the performance and reusability of PANI/ZnO composites in degrading methylene blue under visible light irradiation. The composites were fabricated via a green synthesis method of ZnO using pineapple peel extract as a bioreductant, followed by in-situ polymerization to incorporate PANI. Material characterization was performed using X-ray diffraction (XRD) and UV-Vis spectrophotometry. The XRD results confirmed the formation of a dominant hexagonal wurtzite ZnO phase combined with a semicrystalline PANI structure without damaging the main crystal structure. UV-Vis analysis showed that the PANI/ZnO composite sample (PZ5 with a ZnO mass of 0.5 grams) had a band gap energy of 2.52 eV, significantly lower than that of pure ZnO, which is 3.23 eV. This reduction in the band gap enhances the material's ability to utilize the visible light spectrum. In photocatalytic activity tests, the PZ5 composite was able to degrade 87% of methylene blue within 90 minutes. Furthermore, an evaluation of reusability over three cycles demonstrated good stability, with a decrease in degradation efficiency of only 2.20% by the third reuse. Therefore, the PANI/ZnO composite has proven to be an efficient, stable, and environmentally friendly alternative photocatalyst.

***Keywords**: Photodegradation, Methylene blue, PANI/ZnO Composite, Green Synthesis, Reusability.*

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

Perkembangan industri tekstil di Indonesia yang pesat berdampak pada meningkatnya produksi limbah cair, yang diperkirakan mencapai sekitar 1,5 juta ton per tahun menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Limbah ini umumnya mengandung bahan kimia berbahaya, logam berat, serta zat pewarna sintetis seperti *methylene blue* yang bersifat toksik, stabil, dan sulit terdegradasi secara alami maupun melalui metode pengolahan konvensional (Riskiani *et al*., 2019; Cheng *et al*., 2020).

Keberadaan *methylene blue* di perairan dapat menurunkan kualitas air, menghambat proses fotosintesis, serta membahayakan organisme akuatik, sehingga berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem (Atha *et al*., 2025). Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup RI No. 5 Tahun 2014, kadar *methylene blue* yang diperbolehkan dalam air limbah berada pada kisaran 5–10 ppm. Namun demikian, pengelolaan limbah cair yang belum optimal masih menjadi permasalahan, khususnya di negara berkembang (Fito *et al*., 2020; Hashem *et al*., 2020). Berbagai metode pengolahan seperti adsorpsi, fitoremediasi, filtrasi membran, dan biodegradasi telah dikembangkan (Wang *et al*., 2020; Imron *et al*., 2019; Kim *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2019; Van Der Maas *et al*., 2018), namun masing-masing memiliki keterbatasan dari segi efisiensi, biaya, dan dampak lingkungan (Crini & Lichtfouse, 2019). Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran zat pewarna dalam limbah cair.

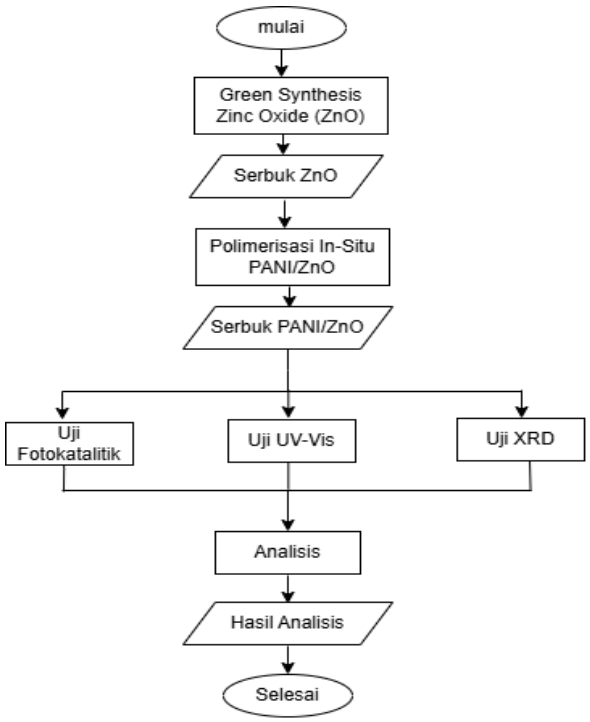
Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah *Advanced Oxidation Processes* (AOP), khususnya fotokatalisis, yang mampu menghasilkan spesies oksidatif kuat seperti radikal hidroksil (•OH) dan superoksida (O_2•$^-$) untuk mendegradasi senyawa organik secara efektif (Khan *et al*., 2020; Ma *et al*., 2019). Metode ini dinilai efisien karena memiliki kemampuan oksidasi tinggi, proses reaksi yang relatif cepat, biaya operasional yang kompetitif, serta bersifat ramah lingkungan (Ahmad *et al*., 2023), dan telah terbukti efektif dalam mendegradasi *methylene blue* (Dzinun *et al*., 2020).

Zinc Oxide (ZnO) merupakan semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis karena sifatnya yang stabil, non-toksik, dan ekonomis (Hosny *et al*., 2023), namun memiliki keterbatasan berupa celah pita energi yang lebar (~3,37 eV) serta tingkat rekombinasi elektron–hole yang tinggi (Ahmad *et al*., 2023). Untuk mengatasi hal tersebut, ZnO dikombinasikan dengan polimer konduktif PANI yang mampu menyerap cahaya tampak dan meningkatkan pemisahan muatan melalui pembentukan heterojungsi p–n (Majeed *et al*., 2022; Jin *et al*., 2018). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO mampu meningkatkan efisiensi degradasi *methylene blue* di bawah cahaya tampak (Sudhadevi *et al*., 2024), bahkan pada berbagai sistem komposit lain seperti PANI-Ag/ZnS dan ZnO juga menunjukkan efisiensi tinggi (Mazhar *et al*., 2022; Kim *et al*., 2023). Namun, penelitian sebelumnya umumnya masih menggunakan ZnO berbasis sintesis kimia konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan komposit PANI/ZnO dengan ZnO yang disintesis melalui metode green synthesis menggunakan ekstrak kulit nanas sebagai bioreduktor. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan material yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, serta memiliki sifat morfologi dan elektronik yang lebih baik, sehingga meningkatkan kinerja fotokatalitik dalam degradasi *methylene blue*.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

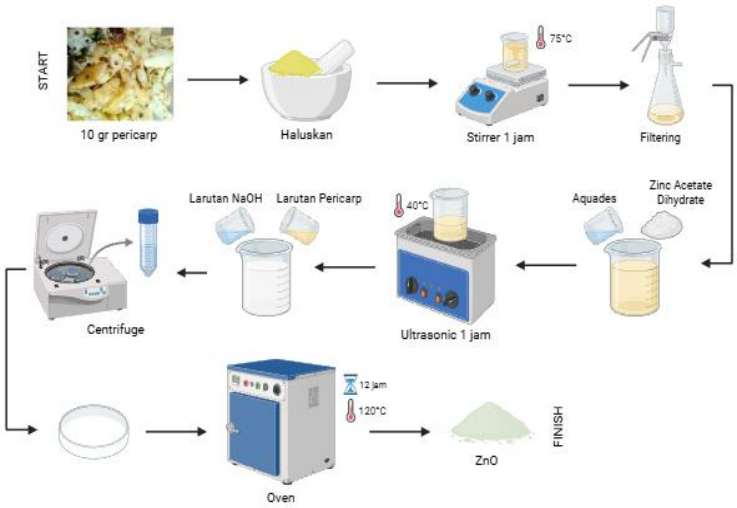
Penelitian ini menggunakan pendekatan riset eksperimental yang dilaksanakan melalui beberapa tahapan utama, meliputi fabrikasi sampel, karakterisasi sampel, serta analisis terhadap data dan hasil karakterisasi yang diperoleh. Setiap tahapan dilakukan secara sistematis dan berkesinambungan untuk memperoleh hasil penelitian yang sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Penelitian ini dilaksanakan pada periode Agustus hingga Desember 2025, bertempat di Laboratorium Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Negeri Surabaya (UNESA). Adapun tahapan pelaksanaan penelitian secara keseluruhan disajikan dalam bentuk diagram alir rencana penelitian berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Sintesis Hijau ZnO

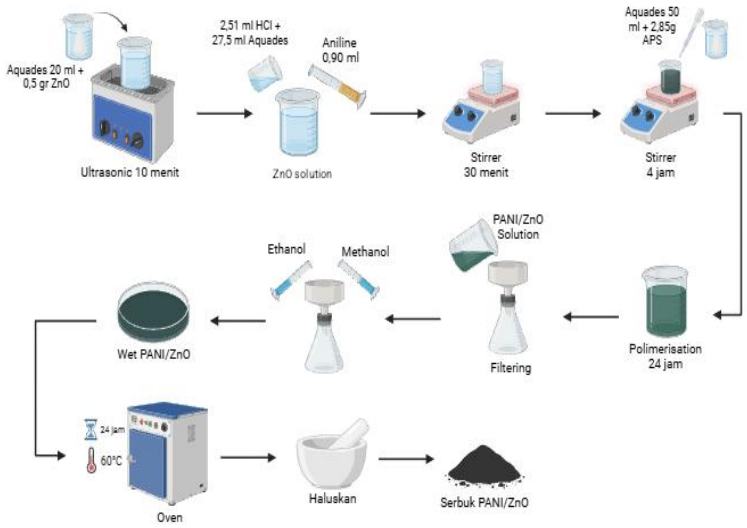
Green synthesis nanopartikel ZnO dilakukan melalui metode yang merujuk pada penelitian Rohmawati *et al*., (2024) menggunakan kulit nanas sebagai bioreduktor. Tahapannya dimulai dengan sebanyak 10 gram kulit nanas dihaluskan menggunakan mortar dan pestle, kemudian hasilnya dimasukkan ke dalam *beaker* 250 mL, dan ditambahkan 100 mL air suling. Larutan tersebut diaduk pada kecepatan 300 rpm pada suhu 75°C selama 1 jam. Setelah itu, larutan disaring, sehingga diperoleh filtrat berwarna kuning. Filtrat tersebut ditambahkan 10 mL air suling dan 4 gram *zinc acetate dihydrate*, kemudian disonikasi pada suhu 40°C selama 1 jam. Selanjutnya, ditambahkan 100 mL NaOH 1 M untuk membentuk larutan putih susu, kemudian disentrifugasi pada kecepatan 3000 rpm, dan hasilnya dikeringkan pada suhu 120°C selama 12 jam. Berikut adalah gambar skema *green synthesis* menggunakan ekstrak kulit nanas.



Gambar 2. Sintesis Hijau ZnO

C. Pembuatan Komposit PANI/ZnO

Sintesis komposit PANI/ZnO dilakukan melalui metode polimerisasi in-situ, merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Maulida & Primary Putri, (2022). Dalam proses ini, sejumlah 0,90 mL anilin dilarutkan dalam 30 mL larutan HCl 1 M. Selanjutnya, serbuk ZnO dilarutkan dalam 20 mL *aquades* dan disonikasi selama 10 menit. Larutan ZnO kemudian dicampurkan ke dalam larutan anilin dan diaduk menggunakan stirrer selama 30 menit. Kemudian, 50 mL larutan APS 0,25 M ditambahkan secara bertahap ke dalam campuran PANI/ZnO dan diaduk selama 4 jam. Endapan yang terbentuk dikumpulkan, disaring, dan dicuci menggunakan etanol serta metanol, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam. Akhirnya, endapan dihaluskan dengan mortar untuk menghasilkan serbuk komposit PANI/ZnO.



Gambar 3. Sintesis PANI/ZnO

D. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada komposit PANI/ZnO dengan massa ZnO tetap sebesar 0,5 gram (PZ5). Oleh karena itu, variabel bebas dalam penelitian ini adalah waktu penyinaran cahaya tampak yang divariasikan setiap 15 menit hingga mencapai 90 menit. Variabel kontrol meliputi massa ZnO sebesar 0,5 gram (PZ5), volume anilin sebesar 0,9 mL, molaritas HCl sebesar 1 M, molaritas ammonium persulfat (APS) sebesar 0,25 M, konsentrasi larutan *methylene blue* sebesar 10 ppm, jumlah siklus *reusability* sebanyak tiga kali, serta penggunaan sumber cahaya berupa lampu metal halide berdaya 250 W. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kinerja fotokatalitik komposit PANI/ZnO yang dievaluasi berdasarkan persentase degradasi *methylene blue* sebagai respons terhadap variasi waktu penyinaran cahaya tampak.

E. Teknik Pengumpulan Data

Data dalam penelitian ini diperoleh melalui karakterisasi material dan pengujian aktivitas fotokatalitik. Karakterisasi material dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi struktur kristal komposit PANI/ZnO. Selain itu, spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk menganalisis sifat optik komposit melalui penentuan energi celah pita (band gap) menggunakan metode *Tauc Plot*, serta mengukur absorbansi larutan *methylene blue* selama penyinaran cahaya tampak. Data absorbansi tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung persentase degradasi sebagai indikator aktivitas fotokatalitik komposit PANI/ZnO.

F. Teknik Pengolahan Data

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dan kualitatif. Analisis kuantitatif dilakukan untuk menentukan persentase degradasi *methylene blue* pada **persamaan 1**, energi celah pita (band gap) pada **persamaan 2**, serta kinetika reaksi fotokatalitik. Analisis kualitatif digunakan untuk menginterpretasikan hasil karakterisasi XRD, sifat optik berdasarkan UV-Vis, serta mekanisme aktivitas fotokatalitik komposit PANI/ZnO.

$$\%\ Degradasi = \frac{Ao - At}{Ao} \times 100\% \quad (1)$$

$$(\alpha hv)^{1/n} = B(hv - E_g) \quad (2)$$

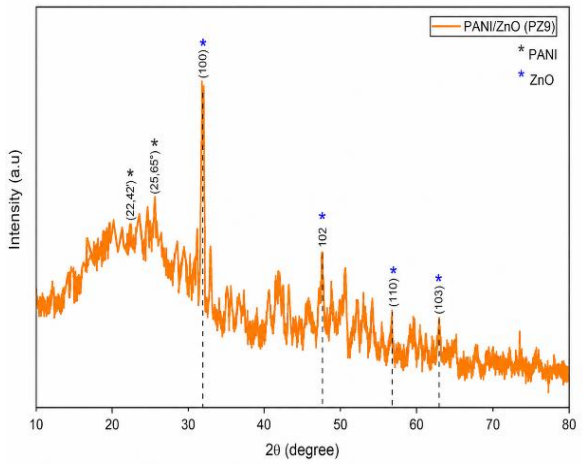
Kinetika reaksi fotokatalitik dianalisis menggunakan model pseudo-first-order berdasarkan hubungan $\ln(A_0/At)$ terhadap waktu penyinaran.

$$\ln\frac{Ao}{At} = kt \quad (3)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Struktur Kristal Komposit PANI/ZnO

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fase penyusun komposit PANI/ZnO. Pola difraksi XRD komposit PANI/ZnO ditunjukkan pada **Gambar 4.**



Gambar 4. Hasil Karakterisasi Komposit PANI/ZnO

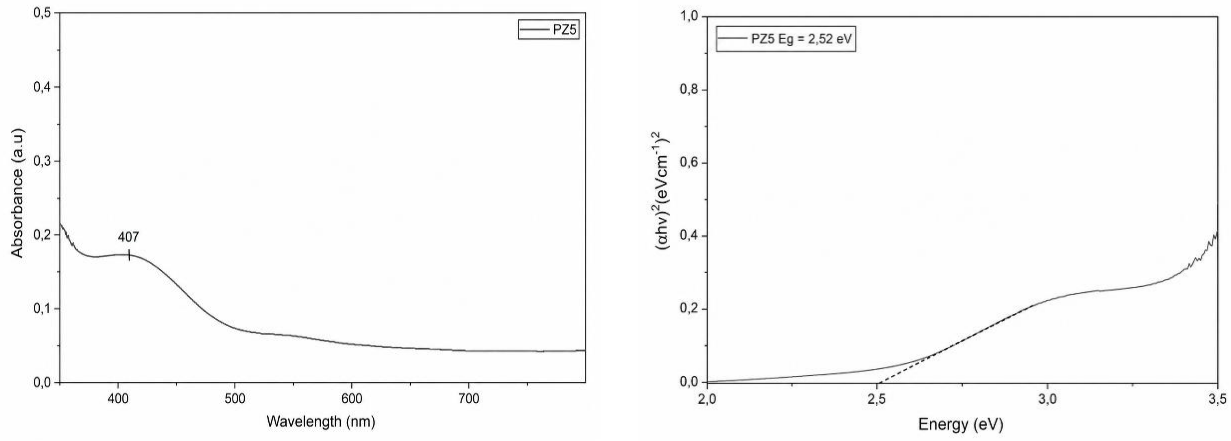
Pola difraksi komposit PANI/ZnO (PZ5) menunjukkan puncak difraksi pada sudut 2θ sekitar 31,84°, 47,59°, 56,56°, dan 62,94° yang masing-masing berkaitan dengan bidang kristal (100), (102), (110), dan (103). Puncak-puncak tersebut sesuai dengan fase ZnO berstruktur heksagonal wurtzite berdasarkan kartu standar JCPDS No. 00-005-0664. Kesesuaian posisi puncak karakteristik dengan data standar JCPDS menunjukkan bahwa fase kristal ZnO tetap teridentifikasi setelah pembentukan komposit PANI/ZnO. Hasil ini sejalan dengan penelitian Rohmawati *et al.* (2024) dan Yanti *et al.* (2024) yang melaporkan pola difraksi ZnO berstruktur heksagonal wurtzite pada rentang sudut 2θ yang serupa.

Selain puncak karakteristik ZnO, difraktogram komposit juga menunjukkan puncak melebar pada sekitar 2θ ≈ 25,65° yang merupakan karakteristik struktur semikristalin PANI. Keberadaan puncak karakteristik ZnO dan PANI secara bersamaan menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO berhasil terbentuk, sementara struktur kristal utama ZnO tetap dipertahankan. Keberadaan antarmuka (heterojunction) antara PANI dan ZnO memfasilitasi transfer muatan antarfasa sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan pasangan elektron–hole dan menekan rekombinasi pembawa muatan. Mekanisme tersebut mendukung pembentukan spesies oksidatif aktif selama proses fotokatalitik sehingga berkontribusi terhadap peningkatan aktivitas fotokatalitik komposit PANI/ZnO pada cahaya tampak (Boudjelida *et al.,* 2024).

B. Hasil Karakterisasi UV-Vis

Spektrum UV-Vis **Gambar 5(a)** menunjukkan bahwa komposit PANI/ZnO mampu menyerap cahaya pada wilayah ultraviolet hingga cahaya tampak. Kemampuan ini dipengaruhi oleh keberadaan PANI yang memiliki sistem elektron π-terkonjugasi. Menurut Mathad *et al.* (2025), PANI menunjukkan puncak serapan

pada sekitar 371, 432, dan 609 nm yang berkaitan dengan transisi elektron π–π*, transisi polaron, dan transisi polaron–bipolaron. Adanya karakteristik serapan tersebut memungkinkan komposit PANI/ZnO memanfaatkan energi cahaya tampak secara lebih efektif dibandingkan ZnO murni. Peningkatan daerah serapan cahaya ini menjadi faktor penting dalam meningkatkan aktivitas fotokatalitik komposit terhadap degradasi *methylene blue*.



(a) (b)

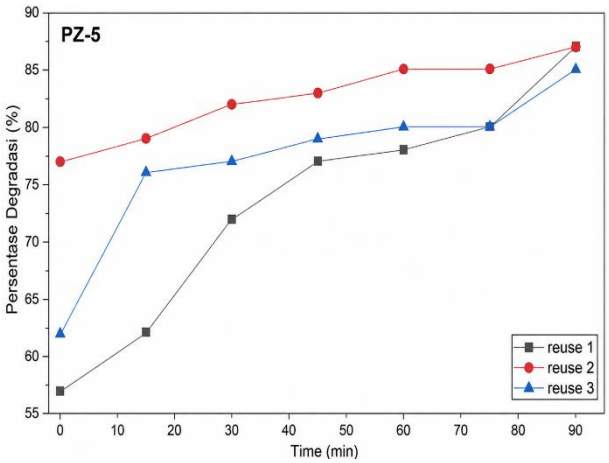
Gambar 5. (a) Hasil Karakterisasi UV-Vis Komposit PANI/ZnO, dan (b) Energi *Band gap* PANI/ZnO

Komposit PANI/ZnO (PZ5) pada **Gambar 5(b)** menunjukkan nilai *band gap* sebesar 2,52 eV yang dihitung menggunakan **Persamaan (2)** dengan metode *Tauc Plot*, nilai yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan ZnO murni sebesar 3,23 eV (Kim *et al.,* 2023). Penurunan energi celah pita ini menunjukkan bahwa komposit lebih mudah tereksitasi oleh cahaya dengan energi yang lebih rendah sehingga mampu memanfaatkan spektrum cahaya tampak secara lebih efektif. Interaksi antara PANI dan ZnO menyebabkan terbentuknya heterojungsi yang menghasilkan tingkat energi baru (donor level) di dekat pita konduksi, sehingga mempermudah perpindahan elektron dan memperluas daerah penyerapan cahaya menuju wilayah visible light. PANI sendiri memiliki nilai *band gap* sekitar 2,90 eV (Rahmawati dan Putri, 2024), yang memungkinkan material menyerap foton berenergi lebih rendah (panjang gelombang lebih besar) dibandingkan ZnO murni. Oleh karena itu, pembentukan komposit PANI/ZnO mampu meningkatkan respons optik terhadap cahaya tampak, mempercepat proses eksitasi elektron, serta meningkatkan pembentukan pasangan elektron–hole yang berperan dalam reaksi fotokatalitik. Hasil ini menunjukkan bahwa penurunan energi celah pita pada komposit PANI/ZnO memberikan dampak positif terhadap aktivitas fotokatalitik material (Belfaa *et al*., 2018). Dengan demikian, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa pembentukan komposit tidak mengubah fase kristal ZnO, sedangkan hasil UV-Vis menunjukkan bahwa interaksi PANI–ZnO berhasil memodifikasi sifat optiknya melalui penurunan nilai band gap.

C. Hasil Uji Fotokatalitik Komposit PANI/ZnO

Hasil uji aktivitas fotokatalitik dianalisis menggunakan spektroskopi UV-Vis untuk mengamati hubungan antara panjang gelombang dan absorbansi larutan. Data spektrum UV-Vis kemudian digunakan untuk menghitung persentase degradasi *methylene blue* berdasarkan nilai absorbansi pada panjang gelombang maksimum, yaitu 664 nm, menggunakan **Persamaan (1)**. Perhitungan tersebut menghasilkan data kinerja fotokatalitik yang selanjutnya disajikan pada **Gambar 6**.

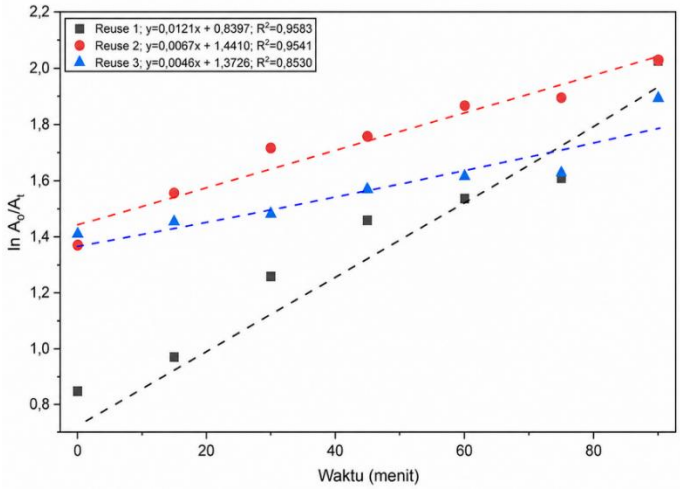
Berdasarkan **Gambar 6**, persentase degradasi *methylene blue* meningkat seiring bertambahnya waktu penyinaran cahaya tampak pada setiap siklus *reusability*. Pada *reusability* pertama, efisiensi degradasi meningkat dari 57% menjadi 87% setelah 90 menit penyinaran. Sementara itu, pada *reusability* kedua dan ketiga, efisiensi degradasi akhir masing-masing mencapai 87% dan 85%. Peningkatan efisiensi degradasi menunjukkan bahwa semakin lama waktu penyinaran, semakin banyak pasangan elektron-hole yang terbentuk sehingga jumlah spesies oksidatif aktif yang dihasilkan selama proses fotokatalitik juga meningkat.



Gambar 6. Hasil Persentase Degradasi Fotokatalitik Komposit PANI/ZnO (PZ5)

Ketika komposit PANI/ZnO disinari cahaya tampak, PANI berperan sebagai sensitizer cahaya tampak *(visible-light sensitizer)* karena memiliki nilai band gap yang lebih kecil dibandingkan ZnO. Elektron tereksitasi dari tingkat HOMO menuju LUMO pada PANI kemudian ditransfer ke pita konduksi ZnO sehingga mampu menghambat rekombinasi pasangan elektron–hole (Azmayesh *et al*., 2024). Elektron pada pita konduksi ZnO selanjutnya bereaksi dengan molekul oksigen yang teradsorpsi pada permukaan katalis membentuk radikal superoksida ($O_2^{\bullet -}$), sedangkan hole bereaksi dengan molekul air atau ion hidroksida menghasilkan radikal hidroksil (•OH). Kedua spesies reaktif tersebut berperan sebagai oksidator kuat yang mampu memutus ikatan kromofor dan struktur aromatik pada molekul *methylene blue*, sehingga menghasilkan senyawa antara yang lebih sederhana dan selanjutnya berpotensi mengalami mineralisasi menjadi CO_2 dan H_2O (Adjovi *et al*., 2025; González & Jaramillo-Fierro, 2025; Saravanan *et al*., 2016).

Sejalan dengan mekanisme tersebut, komposit PANI/ZnO mampu mempertahankan efisiensi degradasi yang tinggi hingga mencapai 87% setelah 90 menit penyinaran. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pembentukan heterojunction antara PANI dan ZnO mampu meningkatkan pemanfaatan cahaya tampak serta mempercepat pembentukan radikal aktif yang berperan dalam proses degradasi *methylene blue*. Selain itu, nilai band gap sebesar 2,52 eV juga mendukung eksitasi elektron pada energi yang lebih rendah sehingga aktivitas fotokatalitik komposit menjadi lebih optimal.



Gambar 7. Grafik kinetika reaksi orde satu PANI/ZnO (PZ5) pada Tiga Kali Reusability

Untuk mengetahui pengaruh *reusability* terhadap laju degradasi, dilakukan analisis kinetika fotokatalitik menggunakan model pseudo-first-order berdasarkan hubungan $\ln(A_0/At)$ terhadap waktu penyinaran. Hasil analisis ditunjukkan pada **Gambar 7**. Hubungan antara $\ln(A_0/At)$ dan waktu penyinaran

menunjukkan kecenderungan linier sehingga proses degradasi *methylene blue* dapat didekati menggunakan model kinetika pseudo-first-order. Nilai konstanta laju reaksi (k) yang diperoleh berturut-turut sebesar 0,0287; 0,0076; dan 0,0046 menit^{-1} untuk *reusability* penggunaan pertama hingga ketiga. Penurunan nilai konstanta laju reaksi menunjukkan bahwa laju fotodegradasi methylene blue menurun setelah fotokatalis digunakan secara berulang. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh adsorpsi produk samping hasil degradasi pada permukaan fotokatalis yang menutupi sebagian situs aktif sehingga menghambat proses transfer muatan fotogenerasi. Selain itu, senyawa hasil degradasi yang teradsorpsi juga dapat mengurangi penyerapan cahaya serta meningkatkan rekombinasi pasangan elektron–hole sehingga pembentukan radikal aktif menjadi berkurang dan aktivitas fotokatalitik sedikit menurun (Yang *et al*., 2021).

Meskipun terjadi penurunan konstanta laju reaksi, komposit PANI/ZnO masih mampu mempertahankan aktivitas fotokatalitik yang baik. Hasil uji reusability menunjukkan bahwa efisiensi degradasi tetap berada di atas 85% hingga *reusability* ketiga, dengan penurunan efisiensi sebesar 2,20% dari *reusability* kedua ke *reusability* ketiga. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar situs aktif fotokatalis masih dapat dipertahankan setelah *reusability*. Dengan demikian, komposit PANI/ZnO menunjukkan stabilitas awal yang baik selama tiga kali *reusability* sehingga berpotensi digunakan sebagai fotokatalis yang dapat digunakan kembali (*reusable photocatalyst*) pada proses degradasi *methylene blue*.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Pembentukan komposit PANI/ZnO berhasil menurunkan nilai energi celah pita *(band gap)* komposit menjadi 2,52 eV jauh lebih rendah dari ZnO murni (3,20 eV) sehingga daerah serapan material berhasil diperluas menuju wilayah cahaya tampak. Dari segi kinerja, aktivitas fotokatalitik komposit PANI/ZnO (PZ5) menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang baik dengan kemampuan mendegradasi *methylene blue* hingga 87% dalam waktu 90 menit di bawah penyinaran cahaya tampak. Selain itu, material ini menunjukkan tingkat reusabilitas fotokatalitik yang baik karena hanya mengalami penurunan efisiensi maksimal sebesar 2,20% setelah tiga kali *reusability*.

B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian pada variasi konsentrasi awal *methylene blue* guna mengetahui kapasitas degradasi maksimal komposit. Selain itu, perlu dilakukan variasi sumber pencahayaan, khususnya menggunakan sinar yang lebih kuat, untuk mengevaluasi efisiensi operasional dan kelayakan aplikasi komposit ini secara ekonomis di skala nyata.

DAFTAR PUSTAKA

A.H. Hashem, E. Saied, M.S. Hasanin, Green and ecofriendly bio-removal of *methylene blue* dye from aqueous solution using biologically activated banana peel waste, Sustainable Chemistry and Pharmacy 18 (2020) 100333. https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100333

A.S. Van Der Maas, N.J.R. Da Silva, A.S.V. Da Costa, A.R. Barros, C.A. Bomfeti, "The degradation of *methylene blue* dye by the strains of Pleurotus sp. with potential applications in bioremediation processes," Rev. Ambient. Agua, vol. 13, p. e2247, 2018. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2247

Adjovi, S. E., Calatayud, M., & Gracia, L. (2025). Computational Study of ZnO Surface Catalysis: Adsorption of H_2O or/and O_2 as a Pathway to ROS Formation. Nanomaterials, 15(1328). https://doi.org/10.3390/nano15171328

Atha, A. N., Susanti, E. D., Fitria, A. Z. N., Pasha, E. I., Sari, E. T., Fadilla, N. A. F., Iskandar, D. V., & Arini, L. D. D. (2025). Efektivitas penggunaan pewarna metilen blue dalam pengamatan bentuk sel pada kulit katak. *Nian Tana Sikka: Jurnal Ilmiah Mahasiswa*, *3*(4), 60–65. https://doi.org/10.59603/niantanasikka.v3i4.928

Azmayesh, R., Naghshara, H., Aref, S. M., & Ghafouri, M. (2024). Preparation of a polyaniline/ZnO-NPs composite for the visible-light-driven hydrogen generation. Scientific Reports, 14(3165). https://doi.org/10.1038/s41598-024-53672-2

Belfaa, K., Lassoued, M. S., Ammar, S., & Gadri, A. (2018). Synthesis and characterization of V-doped TiO2 nanoparticles through polyol method with enhanced photocatalytic activities. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(12), 10269–10276. https://doi.org/10.1007/s10854-018-9080-6

Boudjelida, S., Li, X., Djellali, S., Chiappetta, G., Russo, F., Figoli, A., & Carraro, M. (2024). Synthesis and Characterization of Polyaniline Emeraldine Salt (PANI-ES) Colloids Using Potato Starch as a Stabilizer to Enhance the Physicochemical Properties and Processability. Materials, 17(12). https://doi.org/10.3390/ma17122941

Dzinun, H., Ichikawa, Y., Honda, M., and Zhang, Q. "Efficient immobilised TiO_2 in polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for photocatalytic degradation of *methylene blue*," J. Membr. Sci. Res., vol. 6, pp. 188–195, 2020. https://doi.org/10.22079/JMSR.2020.122661.1312

González, S., & Jaramillo-Fierro, X. (2025). Density Functional Theory Study of *Methylene blue* Demethylation as a Key Step in Degradation Mediated by Reactive Oxygen Species. International Journal of Molecular Sciences, 26(1756). https://doi.org/10.3390/ijms26041756

Hosny NM, Gomaa I, Elmahgary MG, *et al*. ZnO doped C: facile synthesis, characterization and photocatalytic degradation of dyes. Sci Rep 2023; 13: 14173.

I. Ahmad, Y. Zou, J. Yan, *et al*., Semiconductor photocatalysts: a critical review highlighting the various strategies to boost the photocatalytic performances for diverse applications, Adv. Colloid Interface Sci. 311 (2023) 102830. https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102830

J. Cheng, C. Zhan, J. Wu, Z. Cui, J. Si, Q. Wang, X. Peng, L.-S. Turng, highly efficient removal of *methylene blue* dye from an aqueous solution using cellulose acetate nanofibrous membranes modified by polydopamine, ACS Omega 5 (2020) 5389–5400. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04425

J. Fito, S. Abrham, K. Angassa, Adsorption of *methylene blue* from textile industrial wastewater onto activated carbon of Parthenium hysterophorus, Int. J. Environ. Res. 14 (2020) 501–511. https://doi.org/10.1007/s41742-020-00273-2

Jin, X.; Liu, G.; Bao, C.; Chen, M.; Huang, Q. Improved stability and dispersity of ZnO@PANI nanocomposites aqueous suspension. Appl. Organomet. Chem. 2018, 32, 4411.

Khan, I., Saeed, K., Ali, N., Khan, I., Zhang, B., and Sadiq, M. "Heterogeneous photodegradation of industrial dyes: An insight to different mechanisms and rate affecting parameters," J. Environ. Chem. Eng., vol. 8, 104364, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104364

Khumphon, J., Ahmed, R., Imboon, T., Giri, J., Chattham, N., Mohammad, F., Kityakarn, S., Mangala Gowri, V., & Thongmee, S. (2025). Boosting Photocatalytic Activity in Rhodamine B Degradation Using Cu-Doped ZnO Nanoflakes. ACS Omega, 10(9), 9337–9350. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10034

Kim, S., Son, N., Park, S.-M., Lee, C.-T., Pandey, S., & Kang, M. (2023). Facile Fabrication of Oxygen-Defective ZnO Nanoplates for Enhanced Photocatalytic Degradation of *Methylene blue* and In Vitro Antibacterial Activity. Catalysts, 13(3), 567. https://doi.org/10.3390/catal13030567

M.F. Imron, S.B. Kurniawan, A. Soegianto, F.E. Wahyudianto, "Phytoremediation of *methylene blue* using duckweed (Lemna minor)," Heliyon, vol. 5, p. e02206, 2019. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02206

Ma, J., Wang, S., Jiang, J., Wang, P., Guo, P., & Huang, Z. (2019). Recent advances in visible-light-driven photocatalysis for water disinfection and detoxification. Journal of Hazardous Materials, 373, 1-14. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.034.

Majeed, A. H., Mohammed, L. A., Hammoodi, O. G., Sehgal, S., Alheety, M. A., Saxena, K. K., Dadoosh, S. A., Mohammed, I. K., Jasim, M. M., & Salmaan, N. U. (2022). A review on polyaniline: Synthesis, properties, nanocomposites, and electrochemical applications. International Journal of Polymer Science, 2022, Article ID 9047554. https://doi.org/10.1155/2022/9047554

Mathad, G., Pathar, D., Subramanya, K., Shivaprakash, Y., & Gurikar, S. G. (2025). Studies on Structural,

Optical, Thermal and Dielectric Properties of Polyaniline/ZnO Nanocomposites Synthesized by In-Situ Polymerization. Indian Journal of Science and Technology, 18(5), 337–346. https://doi.org/10.17485/ijst/v18i5.gavisddayya

Maulida, L. N., & Primary Putri, N. (2022). Karakteristik Komposit PANi/ZnO Sebagai Bahan Dasar Sensor Gas. Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI), 11, 38–43.

Rahmawati, E., & Putri, N. P. (2024). Sintesis dan Karakterisasi PANI/Fe_3O_4 Menggunakan Fe_3O_4dari Pasir Besi Gunung Galunggung Jawa Barat. *Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, *13*(2), 45–50. https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/Inovasi-fisika-Indonesia

Riskiani, E., Suprihatin, I. E., & Sibarani, J. (2019). Fotokatalis Bentonit-Fe2O3 Untuk Degradasi Zat Warna Remazol Brilliant Blue. Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry),7(1).

Rohmawati, L., Lailia, L. R., Putri, N. P., Nasir, M., & Darminto, D. (2024). Characterization of ZnO Nanoparticles Pineapple Skin Extract (Ananas comosus L.) as Photocatalytic Activity. Journal of Water and Environmental Nanotechnology, 9(1), 112–123. https://doi.org/10.22090/jwent.2024.01.08

S. Kim, M. Yu, Y. Yoon, "Fouling and retention mechanisms of selected cationic and anionic dyes in a $Ti_3C_2T_x$ MXene–ultrafiltration hybrid system," ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 12, pp. 16557–16565, 2020. https://doi.org/10.1021/acsami.0c01035

Saravanan, R., Sacari, E., Gracia, F., Khan, M. M., Mosquera, E., & Gupta, V. K. (2016). Conducting PANI stimulated ZnO system for visible light photocatalytic degradation of coloured dyes. Journal of Molecular Liquids, 221, 1029–1033. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.074

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, 1–18. https://doi.org/10.1177/09673911241288320

Yanti, D. D., Angelina, G., Ashari, A., Agung, A. A. J., & Ayuwulanda, A. (2024). The Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles Using Extract Tomato (Solanum lycopersicum) As Capping Agent and Its Antioxidant Activity. Stannum : Jurnal Sains Dan Terapan Kimia, 6(1), 10–20. https://doi.org/10.33019/jstk.v6i1.4394

Z. Wang, M. Gao, X. Li, J. Ning, Z. Zhou, G. Li, Efficient adsorption of *methylene blue* from aqueous solution by graphene oxide modified persimmon tannins, Mater. Sci. Eng. C 108 (2020) 110196. https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110196

Zhang, D., Dai, F., Zhang, P., An, Z., Zhao, Y., & Chen, L. (2019). The photodegradation of *methylene blue* in water with PVDF/GO/ZnO composite membrane. Materials Science and Engineering C, 96(March 2018), 684–692. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.11.049