

Kode>Nama Rumpun Ilmu: /Kimia

LAPORAN PENELITIAN



RESPONS **FOTOLUMINESSENSI NANOPARTIKEL ZNO HASIL SINTESIS SIL-GEL UNTUK** **DETEKSI PB2+ PADA MINUMAN HERBAL KUNYIT ASAM**

TIM PENGUSUL **Peneliti**

Marius Agung Sasmita Jati, S.Si, M.Sc.
NIDN : 0522028503

Apt. Febriana Astuti, M.Sc.
NIDN :

POLITEKNIK KESEHATAN TNI AU ADISUTJIPTO
YOGYAKARTA
APRIL 2026

HALAMAN PENGESAHAN

1. Judul Penelitian	:	Respons Fotoluminesensi Nanopartikel ZnO Hasil Sintesis Sil-Gel untuk Deteksi Pb ²⁺ pada Minuman Herbal Kunyit Asam
2. Bidang ilmu penelitian	:	Kimia
3. Ketua Peneliti	:	Marius Agung Sasmita Jati, S.Si, M.Sc.
a. Nama Lengkap	:	Pria
b. Jenis Kelamin	:	0522028503
c. NIDN	:	III C
d. Pangkat/Golongan	:	Lektor
e. Jabatan Fungsional	:	Farmasi
f. Fakultas/Jurusan	:	
4. Anggota	:	
a. Nama Lengkap	:	Apt. Febriana Astuti, M.Sc.
b. Jenis Kelamin	:	Wanita
c. NIDN	:	0527029002
d. Pangkat/Golongan	:	III B
e. Jabatan Fungsional	:	Lektor
f. Fakultas/Jurusan	:	Farmasi
5. Jumlah TIM Peneliti	:	3 (1 mahasiswa)
6. Lokasi Penelitian	:	Laboratorium (eksperimental)
7. Waktu Penelitian	:	6 Bulan
8. Biaya	:	Rp. 5.000.000,00
	:	

Ketua Prodi D3 Farmasi



Yogyakarta, April 2026
Peneliti,

Marius Agung Sasmita Jati, S.Si, M.Sc.

NIDN : 0522028503

Menyetujui,
Kepala Unit Penelitian dan Pengabdian Masyarakat

Marius Agung Sasmita Jati, S.Si, M.Sc.

NIDN: 0503098302

Abstrak

Timbal (Pb^{2+}) merupakan salah satu kontaminan logam berat yang perlu mendapat perhatian pada produk herbal, termasuk jamu kunyit asam. Penelitian ini bertujuan mensintesis nanopartikel zinc oxide (ZnO) menggunakan metode sol–gel dan mengevaluasi karakteristiknya serta respons optiknya terhadap ion Pb^{2+} dalam matriks jamu kunyit asam. Karakterisasi dilakukan menggunakan X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray (EDX), Fourier Transform Infrared (FTIR), Particle Size Analyzer (PSA), dan zeta potential. Hasil XRD menunjukkan terbentuknya fase heksagonal wurtzite ZnO dengan kristalinitas yang baik, sedangkan SEM menunjukkan morfologi partikel yang cenderung beragregasi. Analisis EDX menunjukkan dominasi Zn dan O dengan komposisi atom masing-masing sekitar 49% dan 51%. Analisis PSA-DLS menghasilkan Z-average sebesar 742,6 nm dan PDI 0,37, sedangkan zeta potential sebesar $-15,84$ mV menunjukkan kecenderungan stabilitas dispersi yang rendah hingga sedang. FTIR mengonfirmasi keberadaan ikatan Zn–O dan gugus hidroksil pada permukaan. Pengujian menggunakan UV menunjukkan peningkatan pendaran setelah penambahan Pb^{2+} pada konsentrasi 5, 10, dan 20 ppm. Hasil ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berpotensi dikembangkan sebagai platform respons optik sederhana untuk skrining Pb^{2+} pada matriks herbal nyata.

Kata kunci: nanopartikel ZnO; Pb^{2+} ; jamu kunyit asam; sol–gel; fotoluminesensi; sensor optik.

PENDAHULUAN

Produk herbal dan pangan fungsional semakin banyak dikonsumsi sebagai bagian dari upaya menjaga kesehatan dan mencegah berbagai penyakit. Meskipun berasal dari bahan alami, keamanan produk herbal tetap menjadi perhatian karena bahan bakunya berpotensi terpapar berbagai kontaminan selama proses budidaya, pengolahan, penyimpanan, hingga distribusi. Salah satu kontaminan yang paling banyak mendapat perhatian adalah logam berat, terutama timbal (Pb^{2+}), yang dapat berasal dari tanah, air irigasi, pupuk, limbah industri, maupun peralatan pengolahan yang digunakan selama proses produksi (Favre-Godal et al., 2022; Hlihor et al., 2022; Luo et al., 2020). Berbeda dengan kontaminan organik, Pb^{2+} bersifat persisten, tidak dapat terurai secara alami, serta mudah terakumulasi di dalam jaringan biologis sehingga keberadaannya dalam produk herbal menjadi perhatian serius bagi kesehatan masyarakat (Cheng et al., 2025; Jaishankar et al., 2014; Rojas et al., 2021).

Paparan Pb^{2+} secara terus-menerus, meskipun dalam kadar rendah, diketahui dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, antara lain kerusakan sistem saraf, penurunan fungsi ginjal, gangguan pembentukan sel darah, penurunan kemampuan kognitif, hingga peningkatan stres oksidatif akibat terbentuknya spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species*, ROS) (Jasińska-Balwierz et al., 2025; Lopes et al., 2016; Rojas et al., 2021). Dampak tersebut menjadi lebih serius karena Pb^{2+} memiliki waktu tinggal (*biological half-life*) yang relatif panjang di dalam tubuh, sehingga paparan berulang dapat meningkatkan risiko bioakumulasi dan efek toksik jangka panjang (Genchi et al., 2020; WHO, 2021). Oleh karena itu, berbagai lembaga internasional, termasuk **World Health Organization (WHO)** dan **Codex Alimentarius Commission**, menempatkan pengawasan kandungan logam berat pada pangan dan produk herbal sebagai bagian penting dalam sistem keamanan pangan global (WHO, 2021).

Meningkatnya konsumsi produk herbal di berbagai negara mendorong kebutuhan akan metode analisis yang mampu mendeteksi Pb^{2+} secara cepat, sensitif, dan selektif, terutama pada sampel nyata (*real samples*) yang memiliki matriks kimia kompleks. Metode konvensional seperti **Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)**, **Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)**, dan **Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)** memang menawarkan akurasi yang tinggi, namun umumnya memerlukan instrumen yang mahal, preparasi sampel yang cukup rumit, serta waktu analisis yang relatif lama (Caporale et al., 2022; Plotka-Wasyłka et al., 2021; Zhang et al., 2023). Kondisi tersebut mendorong berkembangnya berbagai material sensor yang mampu memberikan proses deteksi lebih sederhana tanpa mengurangi sensitivitas, sehingga berpotensi diterapkan sebagai alternatif analisis logam berat pada produk herbal maupun pangan fungsional.

Jamu kunyit asam merupakan salah satu produk herbal tradisional yang paling banyak dikonsumsi di Indonesia karena dipercaya memiliki berbagai manfaat kesehatan. Minuman ini umumnya dibuat dari **Curcuma longa L.** dan **Tamarindus indica L.**, yang kaya akan senyawa bioaktif seperti kurkuminoid, flavonoid, senyawa fenolik, polisakarida, serta berbagai

metabolit sekunder yang berkontribusi terhadap aktivitas antioksidan, antiinflamasi, antimikroba, dan hepatoprotektif (Sharma et al., 2022; Amalraj et al., 2017; Hewlings & Kalman, 2017; Salehi et al., 2019). Meningkatnya konsumsi jamu kunyit asam sebagai minuman kesehatan menunjukkan pentingnya jaminan mutu dan keamanan produk, terutama karena produk ini dikonsumsi secara rutin oleh masyarakat. Oleh sebab itu, selain mempertahankan kandungan senyawa bioaktifnya, pengawasan terhadap kemungkinan adanya kontaminan, termasuk logam berat, juga menjadi aspek yang tidak dapat diabaikan dalam pengendalian kualitas produk herbal (WHO, 2021; FAO & WHO, 2023).

Di sisi lain, karakteristik kimia jamu kunyit asam justru menjadi tantangan dalam proses analisis logam berat. Kandungan berbagai senyawa organik, seperti polifenol, flavonoid, protein, asam organik, dan pigmen alami, membentuk matriks yang kompleks sehingga dapat menimbulkan **matrix interference**, yaitu gangguan yang memengaruhi sensitivitas, selektivitas, maupun akurasi pengukuran analit (Płotka-Wasyłka et al., 2021; Zhang et al., 2023; Caporale et al., 2022). Kondisi ini menyebabkan proses deteksi Pb^{2+} pada sampel herbal jauh lebih sulit dibandingkan pada larutan standar, karena ion logam dapat berinteraksi dengan komponen organik melalui mekanisme kompleksasi, adsorpsi, maupun pembentukan kelat (*chelation*), sehingga memengaruhi respons analitik yang dihasilkan (Li et al., 2021; Saha et al., 2023). Oleh karena itu, metode analisis yang digunakan harus mampu mempertahankan sensitivitasnya meskipun diaplikasikan pada sistem dengan komposisi kimia yang kompleks.

Selain tantangan yang berasal dari matriks sampel, tanaman obat juga diketahui memiliki kemampuan menyerap dan mengakumulasi logam berat dari lingkungan tumbuhnya. Kontaminasi Pb^{2+} dapat berasal dari tanah, air irigasi, pupuk, deposisi atmosfer, maupun aktivitas industri di sekitar lahan budidaya, kemudian terakumulasi pada jaringan tanaman dan berpotensi terbawa hingga produk herbal siap konsumsi (Wang et al., 2022; Saha et al., 2023; Liu et al., 2024; European Food Safety Authority, 2024). Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa kandungan logam berat pada tanaman obat sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan proses pengolahan pascapanen, sehingga keberadaannya sering kali sulit diprediksi hanya berdasarkan kualitas bahan baku (Caporale et al., 2022; Li et al., 2021). Temuan tersebut menunjukkan bahwa pemantauan kandungan Pb^{2+} pada produk herbal perlu dilakukan secara rutin menggunakan metode yang memiliki sensitivitas tinggi sekaligus mampu bekerja secara andal pada matriks nyata (*real samples*).

Berdasarkan kondisi tersebut, pengembangan material sensor yang mampu mendeteksi Pb^{2+} secara cepat, sensitif, dan selektif pada matriks herbal menjadi sangat penting. Dalam beberapa tahun terakhir, sensor berbasis nanomaterial mulai banyak dikembangkan karena memiliki luas permukaan yang tinggi, jumlah situs aktif yang melimpah, serta kemampuan menghasilkan perubahan sinyal optik ketika berinteraksi dengan ion logam (Zhu et al., 2024; Wang et al., 2023; Armaković et al., 2025; Preeti & Sharma, 2026). Karakteristik tersebut memberikan peluang untuk mengatasi keterbatasan metode konvensional pada sampel dengan matriks kompleks, sehingga pengembangan sensor optik berbasis nanopartikel

menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk analisis Pb^{2+} pada produk herbal. Dengan demikian, diperlukan material yang tidak hanya memiliki sifat optik yang baik, tetapi juga tetap mampu mempertahankan respons analitiknya ketika diaplikasikan pada sistem nyata seperti jamu kunyit asam.

Analisis ion Pb^{2+} hingga saat ini masih didominasi oleh teknik instrumental seperti **Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)**, **Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)**, dan **Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)**. Ketiga metode tersebut dikenal sebagai *gold standard* karena memiliki sensitivitas, akurasi, dan batas deteksi yang sangat baik untuk analisis logam berat pada berbagai jenis sampel (Plotka-Wasylika et al., 2021; Zhang et al., 2023; Camel, 2021). Meskipun demikian, penerapannya masih menghadapi beberapa keterbatasan, terutama untuk analisis cepat di lapangan. Proses preparasi sampel umumnya memerlukan tahap destruksi atau digesti, penggunaan instrumen berbiaya tinggi, serta operator yang memiliki keahlian khusus sehingga kurang praktis untuk pengujian rutin maupun aplikasi **point-of-need** (Caporale et al., 2022; Bulska & Wagner, 2016; Liu et al., 2024). Kondisi tersebut mendorong perlunya metode alternatif yang lebih sederhana, cepat, dan tetap mampu memberikan hasil yang andal, khususnya untuk analisis pada sampel nyata dengan matriks yang kompleks.

Perkembangan nanoteknologi dalam satu dekade terakhir telah membuka peluang baru dalam pengembangan sensor berbasis material semikonduktor. Material nano memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, jumlah situs aktif yang lebih banyak, serta sifat elektronik dan optik yang dapat berubah ketika berinteraksi dengan molekul atau ion tertentu. Karakteristik tersebut memungkinkan nanomaterial menghasilkan sinyal analitik yang sensitif melalui perubahan sifat listrik, elektrokimia, maupun fotoluminesensi setelah berikatan dengan analit (Xu et al., 2023; Armaković et al., 2025; Zhu & Wang, 2025; Wang et al., 2023). Dibandingkan metode konvensional, sensor berbasis nanomaterial juga menawarkan waktu respons yang lebih singkat, kebutuhan preparasi sampel yang lebih sederhana, konsumsi reagen yang lebih rendah, serta peluang untuk dikembangkan menjadi perangkat portabel yang mudah digunakan di luar laboratorium (Preeti & Sharma, 2026; Shrivastava et al., 2022; Li et al., 2024).

Di antara berbagai pendekatan yang dikembangkan, sensor optik berbasis fotoluminesensi menjadi salah satu teknologi yang berkembang paling pesat karena mampu mengubah interaksi antara permukaan material dan analit menjadi sinyal cahaya yang mudah diamati maupun diukur secara kuantitatif. Mekanisme ini memungkinkan proses deteksi berlangsung secara cepat tanpa memerlukan sistem instrumentasi yang rumit. Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai nanomaterial semikonduktor telah dilaporkan memiliki kemampuan mendeteksi ion logam berat melalui perubahan intensitas emisi, pergeseran panjang gelombang, maupun perubahan waktu hidup (*lifetime*) fotoluminesensi (Shakir et al., 2024; Zhu et al., 2024; Thi et al., 2019; Wang et al., 2023). Pendekatan tersebut dinilai menjanjikan karena menggabungkan sensitivitas tinggi dengan kemudahan operasional, sehingga

berpotensi diaplikasikan untuk pemantauan kualitas lingkungan, keamanan pangan, dan produk herbal.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang telah dilaporkan masih berfokus pada pengujian menggunakan larutan standar atau matriks sederhana. Kajian mengenai sensor optik yang mampu mendeteksi Pb^{2+} secara langsung pada matriks herbal yang kompleks masih relatif terbatas, padahal keberadaan berbagai senyawa organik dalam sampel nyata dapat memengaruhi mekanisme adsorpsi maupun respons optik material sensor (Saha et al., 2023; Caporale et al., 2022; Zhang et al., 2023). Oleh karena itu, pengembangan material semikonduktor yang tetap mampu mempertahankan sensitivitas dan stabilitas sinyal optiknya pada kondisi tersebut menjadi tantangan sekaligus peluang penelitian yang penting. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan metode deteksi yang lebih sederhana, cepat, dan aplikatif tanpa mengurangi keandalan analisis terhadap ion Pb^{2+} pada produk herbal.

Di antara berbagai material semikonduktor oksida logam, **zinc oxide (ZnO)** merupakan salah satu material yang paling banyak dikembangkan sebagai platform sensor optik karena memiliki kombinasi sifat elektronik, optik, dan kimia permukaan yang sangat mendukung proses deteksi ion logam. ZnO memiliki **band gap** yang lebar sekitar **3,37 eV** serta energi ikat eksiton sekitar **60 meV**, sehingga mampu menghasilkan emisi fotoluminesensi yang stabil bahkan pada suhu ruang. Karakteristik tersebut menjadikan ZnO memiliki sensitivitas optik yang tinggi terhadap perubahan kondisi permukaan akibat interaksi dengan molekul maupun ion logam (Lv et al., 2019; Rai et al., 2021; Shakir et al., 2024; Zhu & Wang, 2025). Selain itu, ZnO memiliki stabilitas kimia yang baik, bersifat tidak toksik, mudah disintesis, serta kompatibel dengan berbagai metode fabrikasi, sehingga banyak dimanfaatkan pada bidang sensor, fotokatalisis, perangkat optoelektronik, hingga biosensor (Xu et al., 2023; Wang et al., 2023; Armaković et al., 2025; Li et al., 2024).

Kinerja optik ZnO tidak hanya ditentukan oleh struktur kristalnya, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan dan keberadaan **defect states**, seperti **oxygen vacancies (V_O)**, **zinc interstitials (Zn_i)**, maupun cacat intrinsik lainnya yang terbentuk selama proses sintesis. Cacat-cacat tersebut berfungsi sebagai pusat perangkap (*trap states*) sekaligus pusat rekombinasi radiatif yang mengendalikan dinamika pasangan elektron–hole setelah material tereksitasi oleh cahaya ultraviolet (Cabral et al., 2020; Rai et al., 2021; Zhou et al., 2020; Mudassar et al., 2025). Perubahan kecil pada jumlah maupun distribusi *defect states* dapat memengaruhi intensitas dan panjang gelombang emisi fotoluminesensi, sehingga karakteristik optik ZnO sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan kimia di sekitar permukaannya (Pal et al., 2016; Wang et al., 2023; Zhu et al., 2024). Sensitivitas inilah yang menjadi dasar pemanfaatan ZnO sebagai material aktif pada berbagai sensor berbasis luminesensi.

Ketika permukaan ZnO berinteraksi dengan ion logam seperti Pb^{2+} , terjadi perubahan distribusi muatan permukaan yang diikuti oleh interaksi antara ion logam dengan gugus hidroksil (Zn-OH), atom oksigen permukaan, maupun situs cacat yang tersedia. Interaksi

tersebut dapat memodifikasi tingkat energi *defect states*, meningkatkan proses transfer muatan (*charge transfer*), serta mengubah mekanisme rekombinasi elektron–hole sehingga menghasilkan perubahan intensitas emisi fotoluminesensi yang dapat digunakan sebagai sinyal analitik (Krasovska et al., 2018; Thi et al., 2019; Preeti & Sharma, 2026; Armaković et al., 2025). Dengan kata lain, ion Pb^{2+} tidak hanya berperan sebagai analit yang teradsorpsi pada permukaan ZnO, tetapi juga memodulasi sifat optoelektronik material melalui perubahan kondisi elektronik di sekitar *defect sites*. Mekanisme ini menjadikan ZnO sangat prospektif sebagai material transduser pada sensor optik berbasis fotoluminesensi.

Selain sifat intrinsiknya, performa ZnO juga sangat dipengaruhi oleh metode sintesis yang digunakan karena proses pembentukan material menentukan ukuran partikel, kristalinitas, morfologi, luas permukaan spesifik, serta jumlah cacat kristal yang terbentuk. Parameter-parameter tersebut berpengaruh langsung terhadap jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi dan efisiensi transfer muatan selama interaksi dengan ion logam (Samanta, 2020; Rai et al., 2021; Shakir et al., 2024; Xu et al., 2023). Oleh karena itu, pemilihan metode sintesis menjadi tahap yang sangat penting dalam memperoleh nanopartikel ZnO dengan karakteristik optik yang optimal. Pengendalian ukuran partikel, distribusi cacat, dan kimia permukaan tidak hanya meningkatkan stabilitas emisi fotoluminesensi, tetapi juga menentukan sensitivitas dan selektivitas material terhadap ion target, termasuk Pb^{2+} pada matriks yang kompleks.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mensintesis nanopartikel ZnO, antara lain **hidrotermal**, **presipitasi**, **microwave-assisted synthesis**, **chemical vapor deposition (CVD)**, dan **sol–gel**. Masing-masing metode memiliki karakteristik yang berbeda dalam menghasilkan ukuran partikel, morfologi, kristalinitas, serta jumlah *defect states* yang berpengaruh langsung terhadap sifat optik material. Di antara berbagai pendekatan tersebut, metode **sol–gel** banyak dipilih karena proses sintesisnya relatif sederhana, berlangsung pada kondisi yang lebih ringan, berbiaya rendah, serta mampu menghasilkan material dengan kemurnian tinggi dan komposisi yang homogen. Selain itu, metode ini memberikan kontrol yang lebih baik terhadap stoikiometri, ukuran kristalit, serta distribusi gugus hidroksil dan cacat permukaan yang berperan penting dalam proses adsorpsi maupun mekanisme fotoluminesensi (Samanta, 2020; Rai et al., 2021; Shakir et al., 2024; Xu et al., 2023). Karakteristik tersebut menjadikan sintesis **sol–gel** sebagai salah satu pendekatan yang paling prospektif untuk menghasilkan nanopartikel ZnO dengan performa optik yang sesuai bagi aplikasi sensor berbasis luminesensi.

Meskipun penelitian mengenai nanopartikel ZnO berkembang sangat pesat dalam satu dekade terakhir, sebagian besar masih difokuskan pada aplikasi sebagai sensor elektrokimia, fotokatalis, material antibakteri, biosensor, maupun deteksi ion logam menggunakan larutan standar (*model solution*) yang memiliki matriks sederhana (Wang et al., 2023; Li et al., 2024; Zhu et al., 2024; Rai et al., 2021). Padahal, pada aplikasi nyata (*real samples*), terutama produk herbal, keberadaan senyawa organik seperti polifenol, flavonoid, kurkuminoid, protein, dan

asam organik dapat memengaruhi proses adsorpsi ion logam serta respons fotoluminesensi material melalui fenomena *matrix interference* (Caporale et al., 2022; Saha et al., 2023; Zhang et al., 2023; Plotka-Wasyłka et al., 2021). Akibatnya, kinerja sensor yang baik pada larutan standar belum tentu memberikan respons yang sama ketika diaplikasikan pada matriks herbal yang lebih kompleks. Kondisi ini menunjukkan bahwa evaluasi sensor menggunakan sampel nyata masih menjadi tantangan penting yang belum banyak dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya.

Berdasarkan telaah literatur hingga saat ini, penelitian yang secara khusus mengkaji **nanopartikel ZnO hasil sintesis sol–gel sebagai sensor optik berbasis fotoluminesensi untuk mendeteksi ion Pb^{2+} secara langsung pada matriks jamu kunyit asam masih sangat terbatas**. Sebagian besar studi hanya berfokus pada karakterisasi material atau pengujian terhadap larutan sintesis, sehingga hubungan antara karakteristik struktur, kimia permukaan, dan respons optik pada sistem herbal belum dijelaskan secara komprehensif (Xu et al., 2023; Wang et al., 2023; Shakir et al., 2024; Li et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menjembatani kesenjangan tersebut melalui pendekatan yang menghubungkan struktur kristal, morfologi, komposisi unsur, ukuran hidrodinamik, stabilitas dispersi, serta gugus fungsi permukaan ZnO dengan mekanisme peningkatan emisi fotoluminesensi setelah berinteraksi dengan ion Pb^{2+} pada matriks jamu kunyit asam. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan **struktur–permukaan–respons optik (structure–surface–optical response relationship)** pada material ZnO.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya mengevaluasi ZnO dalam sistem yang sederhana, penelitian ini menggunakan **jamu kunyit asam sebagai sampel nyata** untuk mengevaluasi respons fotoluminesensi nanopartikel ZnO terhadap keberadaan ion Pb^{2+} . Pendekatan ini memberikan kontribusi ilmiah karena tidak hanya menilai keberhasilan sintesis ZnO, tetapi juga menjelaskan bagaimana karakteristik kristalinitas, morfologi, komposisi, ukuran partikel, stabilitas dispersi, dan kimia permukaan bekerja secara sinergis dalam memengaruhi mekanisme adsorpsi Pb^{2+} dan modulasi *defect states*. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperluas pemahaman mengenai **hubungan struktur–fungsi (structure–property relationship)** nanopartikel ZnO, tetapi juga menawarkan pendekatan baru dalam pengembangan sensor optik berbasis fotoluminesensi untuk deteksi logam berat pada produk herbal dengan metode yang lebih sederhana, cepat, dan berbiaya rendah. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan platform sensor optik yang lebih aplikatif untuk pengawasan keamanan produk herbal maupun pangan fungsional.

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi zinc acetate dihydrate $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ sebagai prekursor seng dan diethanolamine (DEA) sebagai agen penstabil dan pengompleks dalam proses sintesis sol–gel. Etanol 96%, akuades, dan timbal nitrat $[Pb(NO_3)_2]$ digunakan dalam proses sintesis dan pengujian interaksi nanopartikel terhadap ion Pb^{2+} . Minuman herbal kunyit asam yang mengandung *Curcuma longa* dan *Tamarindus indica*

digunakan sebagai matriks sampel nyata. Seluruh bahan kimia digunakan tanpa pemurnian lebih lanjut. Penggunaan zinc acetate sebagai prekursor dalam media alkohol merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam sintesis ZnO dengan metode sol–gel, karena kondisi reaksi seperti jenis prekursor, pelarut, pH, dan agen pengompleks dapat memengaruhi pembentukan inti, pertumbuhan partikel, morfologi, dan sifat akhir ZnO (Hasnidawani et al., 2016; Shaba et al., 2021).

2.2. Sintesis Nanopartikel ZnO dengan Metode Sol–Gel

Nanopartikel ZnO disintesis menggunakan metode sol–gel dengan zinc acetate dihydrate sebagai prekursor. Sebanyak **1,35 g zinc acetate dihydrate** dilarutkan dalam **50 mL etanol 96%**, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer pada suhu **40–50 °C selama 10–20 menit** hingga diperoleh larutan prekursor yang homogen. Pemanasan ringan digunakan untuk membantu proses pelarutan prekursor tanpa menyebabkan penguapan pelarut secara berlebihan. Penggunaan etanol sebagai medium dan pengaturan suhu selama tahap awal sintesis diketahui dapat memengaruhi proses kompleksasi prekursor, nukleasi, pertumbuhan partikel, dan karakteristik morfologi ZnO (Hasnidawani et al., 2016; Shaba et al., 2021).

Setelah prekursor larut, larutan ditutup menggunakan aluminium foil dan didiamkan selama **24 jam pada suhu ruang** untuk memberikan waktu bagi proses stabilisasi dan aging prekursor. Setelah tahap tersebut, larutan dipanaskan kembali dan **diethanolamine (DEA) sebanyak 0,59 mL** ditambahkan secara perlahan dengan kecepatan sekitar **satu tetes per menit selama 10 menit** sambil terus dilakukan pengadukan. Selama penambahan DEA, pH larutan dipantau dan dipertahankan pada kisaran **9–10**. Penambahan DEA secara bertahap dilakukan untuk menghindari perubahan alkalinitas yang terlalu cepat dan membantu mengontrol proses kompleksasi serta kondensasi prekursor seng. Dalam sintesis ZnO berbasis sol–gel, aminoalkohol seperti DEA dapat berperan sebagai agen pengompleks atau penstabil yang memengaruhi kimia prekursor, pertumbuhan partikel, kristalisasi, dan sifat optik material (Shaba et al., 2021; Singh et al., 2022).

Sol yang terbentuk selanjutnya didiamkan pada suhu ruang untuk menjalani proses aging sebelum tahap pemisahan dan pengeringan. Setelah proses aging, sol disentrifugasi untuk memisahkan material yang telah mengalami kondensasi dari fase cair dan membantu pembentukan gel. Gel yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu **80 °C selama 24 jam** untuk menghilangkan pelarut yang tersisa dan memperoleh serbuk prekursor kering. Serbuk hasil pengeringan selanjutnya diberi perlakuan termal untuk menghilangkan komponen organik yang tersisa dan mendorong pembentukan fase kristalin ZnO. Tahap perlakuan termal merupakan bagian penting dalam sintesis sol–gel karena dekomposisi komponen organik dan proses kristalisasi selama pemanasan dapat memengaruhi fase kristal, ukuran kristalit, morfologi, dan sifat optik ZnO (Shaba et al., 2021; Singh et al., 2022).

Perlakuan termal dilakukan pada suhu **100, 300, dan 450 °C** sesuai dengan rancangan eksperimen penelitian. Setelah proses kalsinasi selesai, serbuk dibiarkan hingga mencapai

suhu ruang dan kemudian disimpan dalam wadah tertutup hingga dilakukan karakterisasi. Variasi suhu perlakuan termal dipertahankan sesuai dengan prosedur eksperimental untuk mengevaluasi perubahan material selama proses transformasi prekursor menjadi ZnO kristalin. Literatur menunjukkan bahwa suhu kalsinasi merupakan salah satu parameter penting yang dapat memengaruhi kristalinitas, ukuran kristalit, morfologi, serta sifat optik ZnO hasil sintesis sol–gel (Singh et al., 2022).

2.3. Karakterisasi Struktur, Morfologi, dan Sifat Permukaan

Serbuk ZnO hasil sintesis dikarakterisasi untuk memperoleh informasi mengenai struktur kristal, morfologi, komposisi unsur, ukuran partikel dalam suspensi, dan gugus fungsi permukaan. Analisis **X-ray Diffraction (XRD)** digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dan mengevaluasi karakteristik kristalinitas material. Pola difraksi yang diperoleh dibandingkan dengan data standar ZnO untuk memastikan fase kristal yang terbentuk.

Analisis **Scanning Electron Microscopy (SEM)** digunakan untuk mengamati morfologi dan kecenderungan agregasi partikel ZnO. Analisis **Energy Dispersive X-ray (EDX)** dilakukan bersamaan dengan SEM untuk menentukan komposisi unsur material serta mengidentifikasi kemungkinan adanya unsur pengotor yang dapat terdeteksi. Selanjutnya, **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)** digunakan untuk mengidentifikasi pita vibrasi yang berkaitan dengan ikatan Zn–O dan gugus fungsi pada permukaan material, khususnya gugus hidroksil.

Ukuran partikel dalam kondisi terdispersi dianalisis menggunakan **Particle Size Analyzer (PSA)** berbasis **Dynamic Light Scattering (DLS)**. Parameter yang diperoleh meliputi **Z-average hydrodynamic diameter** dan **Polydispersity Index (PDI)** untuk menggambarkan ukuran hidrodinamik dan distribusi ukuran partikel dalam suspensi. Selain itu, **zeta potential** diukur untuk memperoleh informasi mengenai muatan permukaan dan kecenderungan stabilitas dispersi nanopartikel. Penggunaan SEM dan DLS secara bersamaan memberikan informasi yang saling melengkapi karena SEM menggambarkan morfologi partikel dalam keadaan kering, sedangkan DLS mengukur ukuran hidrodinamik partikel atau agregat dalam medium cair.

2.4. Pembuatan Larutan Standar Pb^{2+}

Larutan standar Pb^{2+} dibuat menggunakan **$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$** sebagai sumber ion timbal. Sebanyak **3,312 g $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$** dilarutkan menggunakan akuades dan diencerkan hingga volume akhir **100 mL**. Larutan tersebut digunakan sebagai sumber Pb^{2+} untuk pengujian interaksi nanopartikel ZnO dan pembuatan sampel herbal yang ditambahkan Pb.

Untuk pengujian respons terhadap Pb^{2+} , sebanyak **50 mg $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$** dilarutkan dalam **50 mL akuades**. Larutan tersebut selanjutnya digunakan untuk memperoleh sampel dengan konsentrasi nominal Pb sebesar **5, 10, dan 20 ppm**. Variasi konsentrasi tersebut digunakan untuk mengamati perubahan respons optik ZnO terhadap peningkatan konsentrasi Pb^{2+} .

2.5. Preparasi Sampel Jamu Kunyit Asam

Sampel jamu kunyit asam diperoleh dari **lima penjual lokal**. Sampel dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang bersih dan kering, kemudian disentrifugasi untuk mengurangi keberadaan partikel tersuspensi dan memperoleh fase cair yang lebih seragam sebelum pengujian. Sampel selanjutnya dipisahkan menjadi sampel tanpa penambahan Pb^{2+} sebagai kontrol matriks dan sampel yang diberi penambahan Pb^{2+} .

Untuk pengujian menggunakan sampel nyata, aliquot jamu kunyit asam ditambahkan larutan standar Pb^{2+} hingga diperoleh konsentrasi nominal **5, 10, dan 20 ppm**. Sampel tanpa penambahan Pb^{2+} digunakan sebagai kontrol. Seluruh sampel diperlakukan dengan kondisi yang sama untuk meminimalkan pengaruh perbedaan preparasi terhadap respons optik.

2.6. Pengujian Respons Optik Berbasis Fotoluminesensi

Respons optik nanopartikel ZnO terhadap Pb^{2+} diuji dengan menambahkan nanopartikel ZnO ke dalam sampel jamu kunyit asam dan mengamati perubahan emisi ketika sampel disinari ultraviolet. Sampel yang telah mengandung ZnO ditempatkan di dalam ruang penyinaran UV dan disinari pada panjang gelombang **366 nm**. Panjang gelombang tersebut digunakan karena menghasilkan emisi optik yang dapat diamati secara jelas dari material ZnO yang disintesis pada kondisi eksperimen.

Respons optik dievaluasi dengan membandingkan emisi sampel yang mengandung ZnO sebelum dan setelah penambahan Pb^{2+} . Sampel dengan konsentrasi Pb^{2+} sebesar **0, 5, 10, dan 20 ppm** dibandingkan pada kondisi penyinaran yang sama. Perubahan emisi diamati secara visual dan didokumentasikan menggunakan kamera. Peningkatan intensitas emisi setelah penambahan Pb^{2+} diperlakukan sebagai respons optik ZnO terhadap keberadaan ion Pb^{2+} .

Karena penelitian ini menggunakan pengamatan emisi secara visual dan belum dilengkapi dengan pengukuran fotoluminesensi kuantitatif menggunakan spektrofotometer, respons yang diperoleh dalam penelitian ini dinyatakan sebagai **respons optik kualitatif atau semi-kuantitatif**, bukan sebagai metode sensor kuantitatif yang telah tervalidasi. Validasi sebagai sensor kuantitatif memerlukan parameter tambahan seperti kurva kalibrasi, linearitas, limit of detection (LOD), limit of quantification (LOQ), presisi, akurasi/recovery, selektivitas, dan perbandingan dengan metode analisis referensi.

METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi zinc acetate dihydrate [$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] sebagai prekursor seng dan diethanolamine (DEA) sebagai agen penstabil dan pengompleks dalam proses sintesis sol–gel. Etanol 96%, akuades, dan timbal nitrat [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] digunakan dalam proses sintesis dan pengujian interaksi nanopartikel terhadap ion Pb^{2+} . Minuman herbal kunyit asam yang mengandung *Curcuma longa* dan *Tamarindus indica* digunakan sebagai matriks sampel nyata. Seluruh bahan kimia digunakan tanpa pemurnian lebih lanjut. Penggunaan zinc acetate sebagai prekursor dalam media alkohol merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam sintesis ZnO dengan metode sol–gel, karena kondisi reaksi seperti jenis prekursor, pelarut, pH, dan agen pengompleks dapat memengaruhi pembentukan inti, pertumbuhan partikel, morfologi, dan sifat akhir ZnO (Hasnidawani et al., 2016; Shaba et al., 2021).

2.2. Sintesis Nanopartikel ZnO dengan Metode Sol–Gel

Nanopartikel ZnO disintesis menggunakan metode sol–gel dengan zinc acetate dihydrate sebagai prekursor. Sebanyak **1,35 g zinc acetate dihydrate** dilarutkan dalam **50 mL etanol 96%**, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer pada suhu **40–50 °C selama 10–20 menit** hingga diperoleh larutan prekursor yang homogen. Pemanasan ringan digunakan untuk membantu proses pelarutan prekursor tanpa menyebabkan penguapan pelarut secara berlebihan. Penggunaan etanol sebagai medium dan pengaturan suhu selama tahap awal sintesis diketahui dapat memengaruhi proses kompleksasi prekursor, nukleasi, pertumbuhan partikel, dan karakteristik morfologi ZnO (Hasnidawani et al., 2016; Shaba et al., 2021).

Setelah prekursor larut, larutan ditutup menggunakan aluminium foil dan didiamkan selama **24 jam pada suhu ruang** untuk memberikan waktu bagi proses stabilisasi dan aging prekursor. Setelah tahap tersebut, larutan dipanaskan kembali dan **diethanolamine (DEA) sebanyak 0,59 mL** ditambahkan secara perlahan dengan kecepatan sekitar **satu tetes per menit selama 10 menit** sambil terus dilakukan pengadukan. Selama penambahan DEA, pH larutan dipantau dan dipertahankan pada kisaran **9–10**. Penambahan DEA secara bertahap dilakukan untuk menghindari perubahan alkalinitas yang terlalu cepat dan membantu mengontrol proses kompleksasi serta kondensasi prekursor seng. Dalam sintesis ZnO berbasis sol–gel, aminoalkohol seperti DEA dapat berperan sebagai agen pengompleks atau penstabil yang memengaruhi kimia prekursor, pertumbuhan partikel, kristalisasi, dan sifat optik material (Shaba et al., 2021; Singh et al., 2022).

Sol yang terbentuk selanjutnya didiamkan pada suhu ruang untuk menjalani proses aging sebelum tahap pemisahan dan pengeringan. Setelah proses aging, sol disentrifugasi untuk memisahkan material yang telah mengalami kondensasi dari fase cair dan membantu pembentukan gel. Gel yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu **80 °C selama 24 jam** untuk menghilangkan pelarut yang tersisa dan memperoleh serbuk prekursor

kering. Serbuk hasil pengeringan selanjutnya diberi perlakuan termal untuk menghilangkan komponen organik yang tersisa dan mendorong pembentukan fase kristalin ZnO. Tahap perlakuan termal merupakan bagian penting dalam sintesis sol–gel karena dekomposisi komponen organik dan proses kristalisasi selama pemanasan dapat memengaruhi fase kristal, ukuran kristalit, morfologi, dan sifat optik ZnO (Shaba et al., 2021; Singh et al., 2022).

Perlakuan termal dilakukan pada suhu **100, 300, dan 450 °C** sesuai dengan rancangan eksperimen penelitian. Setelah proses kalsinasi selesai, serbuk dibiarkan hingga mencapai suhu ruang dan kemudian disimpan dalam wadah tertutup hingga dilakukan karakterisasi. Variasi suhu perlakuan termal dipertahankan sesuai dengan prosedur eksperimental untuk mengevaluasi perubahan material selama proses transformasi prekursor menjadi ZnO kristalin. Literatur menunjukkan bahwa suhu kalsinasi merupakan salah satu parameter penting yang dapat memengaruhi kristalinitas, ukuran kristalit, morfologi, serta sifat optik ZnO hasil sintesis sol–gel (Singh et al., 2022).

2.3. Karakterisasi Struktur, Morfologi, dan Sifat Permukaan

Serbuk ZnO hasil sintesis dikarakterisasi untuk memperoleh informasi mengenai struktur kristal, morfologi, komposisi unsur, ukuran partikel dalam suspensi, dan gugus fungsi permukaan. Analisis **X-ray Diffraction (XRD)** digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dan mengevaluasi karakteristik kristalinitas material. Pola difraksi yang diperoleh dibandingkan dengan data standar ZnO untuk memastikan fase kristal yang terbentuk.

Analisis **Scanning Electron Microscopy (SEM)** digunakan untuk mengamati morfologi dan kecenderungan agregasi partikel ZnO. Analisis **Energy Dispersive X-ray (EDX)** dilakukan bersamaan dengan SEM untuk menentukan komposisi unsur material serta mengidentifikasi kemungkinan adanya unsur pengotor yang dapat terdeteksi. Selanjutnya, **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)** digunakan untuk mengidentifikasi pita vibrasi yang berkaitan dengan ikatan Zn–O dan gugus fungsi pada permukaan material, khususnya gugus hidroksil.

Ukuran partikel dalam kondisi terdispersi dianalisis menggunakan **Particle Size Analyzer (PSA)** berbasis **Dynamic Light Scattering (DLS)**. Parameter yang diperoleh meliputi **Z-average hydrodynamic diameter** dan **Polydispersity Index (PDI)** untuk menggambarkan ukuran hidrodinamik dan distribusi ukuran partikel dalam suspensi. Selain itu, **zeta potential** diukur untuk memperoleh informasi mengenai muatan permukaan dan kecenderungan stabilitas dispersi nanopartikel. Penggunaan SEM dan DLS secara bersamaan memberikan informasi yang saling melengkapi karena SEM menggambarkan morfologi partikel dalam keadaan kering, sedangkan DLS mengukur ukuran hidrodinamik partikel atau agregat dalam medium cair.

2.4. Pembuatan Larutan Standar Pb²⁺

Larutan standar Pb²⁺ dibuat menggunakan **Pb(NO₃)₂** sebagai sumber ion timbal. Sebanyak **3,312 g Pb(NO₃)₂** dilarutkan menggunakan akuades dan diencerkan hingga volume akhir **100**

mL. Larutan tersebut digunakan sebagai sumber Pb^{2+} untuk pengujian interaksi nanopartikel ZnO dan pembuatan sampel herbal yang ditambahkan Pb.

Untuk pengujian respons terhadap Pb^{2+} , sebanyak **50 mg $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$** dilarutkan dalam **50 mL akuades**. Larutan tersebut selanjutnya digunakan untuk memperoleh sampel dengan konsentrasi nominal Pb sebesar **5, 10, dan 20 ppm**. Variasi konsentrasi tersebut digunakan untuk mengamati perubahan respons optik ZnO terhadap peningkatan konsentrasi Pb^{2+} .

2.5. Preparasi Sampel Jamu Kunyit Asam

Sampel jamu kunyit asam diperoleh dari **lima penjual lokal**. Sampel dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang bersih dan kering, kemudian disentrifugasi untuk mengurangi keberadaan partikel tersuspensi dan memperoleh fase cair yang lebih seragam sebelum pengujian. Sampel selanjutnya dipisahkan menjadi sampel tanpa penambahan Pb^{2+} sebagai kontrol matriks dan sampel yang diberi penambahan Pb^{2+} .

Untuk pengujian menggunakan sampel nyata, aliquot jamu kunyit asam ditambahkan larutan standar Pb^{2+} hingga diperoleh konsentrasi nominal **5, 10, dan 20 ppm**. Sampel tanpa penambahan Pb^{2+} digunakan sebagai kontrol. Seluruh sampel diperlakukan dengan kondisi yang sama untuk meminimalkan pengaruh perbedaan preparasi terhadap respons optik.

2.6. Pengujian Respons Optik Berbasis Fotoluminesensi

Respons optik nanopartikel ZnO terhadap Pb^{2+} diuji dengan menambahkan nanopartikel ZnO ke dalam sampel jamu kunyit asam dan mengamati perubahan emisi ketika sampel disinari ultraviolet. Sampel yang telah mengandung ZnO ditempatkan di dalam ruang penyinaran UV dan disinari pada panjang gelombang **366 nm**. Panjang gelombang tersebut digunakan karena menghasilkan emisi optik yang dapat diamati secara jelas dari material ZnO yang disintesis pada kondisi eksperimen.

Respons optik dievaluasi dengan membandingkan emisi sampel yang mengandung ZnO sebelum dan setelah penambahan Pb^{2+} . Sampel dengan konsentrasi Pb^{2+} sebesar **0, 5, 10, dan 20 ppm** dibandingkan pada kondisi penyinaran yang sama. Perubahan emisi diamati secara visual dan didokumentasikan menggunakan kamera. Peningkatan intensitas emisi setelah penambahan Pb^{2+} diperlakukan sebagai respons optik ZnO terhadap keberadaan ion Pb^{2+} .

Karena penelitian ini menggunakan pengamatan emisi secara visual dan belum dilengkapi dengan pengukuran fotoluminesensi kuantitatif menggunakan spektrofotometer, respons yang diperoleh dalam penelitian ini dinyatakan sebagai **respons optik kualitatif atau semi-kuantitatif**, bukan sebagai metode sensor kuantitatif yang telah tervalidasi. Validasi sebagai sensor kuantitatif memerlukan parameter tambahan seperti kurva kalibrasi, linearitas, limit of detection (LOD), limit of quantification (LOQ), presisi, akurasi/recovery, selektivitas, dan perbandingan dengan metode analisis referensi.

PEMBAHASAN

Material ZnO dikenal sebagai semikonduktor yang memiliki energi ikat eksiton sekitar **60 meV**, sehingga mampu mempertahankan emisi fotoluminesensi secara stabil pada suhu ruang (Lv et al., 2019). Karakteristik ini menjadikan ZnO banyak dimanfaatkan sebagai material optik dan sensor. Secara umum, spektrum fotoluminesensi ZnO terdiri atas emisi ultraviolet (*near-band-edge emission*) yang berasal dari transisi pita energi, serta emisi pada daerah tampak (*visible emission*) yang berkaitan dengan keberadaan cacat intrinsik, seperti **kekosongan oksigen (V_O)**, **interstisial seng (Zn_i)**, dan pasangan donor–akseptor ((Al Mansoori, 2026; Fahad et al., 2021; Purwaningrum et al., 2022; Zhou et al., 2020).

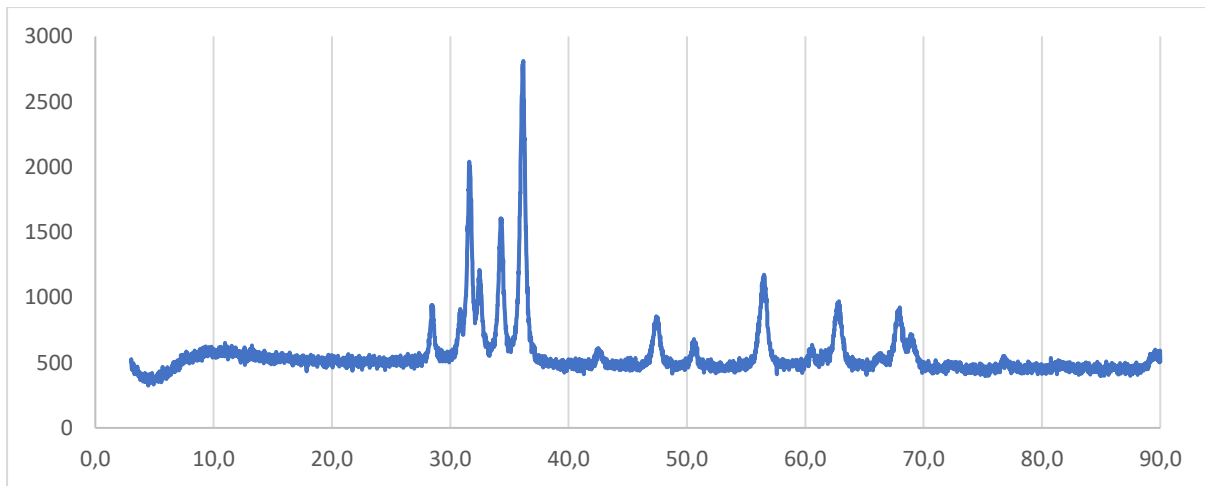
Respons optik nanopartikel ZnO sangat dipengaruhi oleh kualitas struktur kristal, kondisi permukaan, serta jenis dan jumlah cacat kristal yang terbentuk selama proses sintesis. Cacat tersebut berfungsi sebagai pusat rekombinasi elektron–hole yang menentukan intensitas maupun panjang gelombang emisi fotoluminesensi (Cabral et al., 2020; Rai et al., 2021). Bahkan, perubahan kecil pada jumlah *defect states* dapat mengubah proses perpindahan pembawa muatan sehingga menghasilkan respons optik yang berbeda (Pal et al., 2016). Oleh karena itu, sifat optik ZnO tidak hanya ditentukan oleh struktur kristal yang baik, tetapi juga oleh keberadaan cacat kristal yang berperan sebagai pusat jebakan (*trap states*) maupun pusat rekombinasi radiatif (Che et al., n.d.; Gong et al., 2007).

Berdasarkan karakteristik tersebut, diperlukan karakterisasi yang komprehensif untuk menjelaskan hubungan antara struktur material dan sifat optiknya. Analisis **XRD** digunakan untuk memastikan fase kristal dan tingkat kristalinitas, **SEM** untuk mengamati morfologi partikel, **EDX** untuk mengonfirmasi komposisi unsur, **PSA** untuk mengevaluasi ukuran hidrodinamik dan perilaku dispersi partikel, sedangkan **FTIR** digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan ZnO. Kombinasi seluruh karakterisasi tersebut memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai hubungan antara struktur kristal, kondisi permukaan, distribusi cacat, dan mekanisme emisi fotoluminesensi. Dengan demikian, karakteristik ZnO yang diperoleh dapat dijelaskan secara lebih komprehensif sebagai dasar pengembangan material sensor optik berbasis luminesensi (Wang et al., 2023).

Untuk menjelaskan hubungan antara struktur material dan respons optik ZnO, diperlukan karakterisasi yang dilakukan secara komprehensif. Setiap teknik karakterisasi memberikan informasi yang saling melengkapi, sehingga mampu menggambarkan sifat fisik,

kimia, dan struktur nanopartikel secara menyeluruh. Pada penelitian ini, **X-ray Diffraction (XRD)** digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dan tingkat kristalinitas, **Scanning Electron Microscopy (SEM)** untuk mengamati morfologi partikel, **Energy Dispersive X-ray (EDX)** untuk memastikan komposisi unsur, **Particle Size Analyzer (PSA)** untuk mengevaluasi ukuran hidrodinamik dan perilaku partikel dalam suspensi, sedangkan **Fourier Transform Infrared (FTIR)** digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan material. Pendekatan karakterisasi yang terintegrasi ini banyak digunakan dalam penelitian nanomaterial karena mampu memberikan pemahaman yang lebih utuh mengenai hubungan antara struktur kristal, karakteristik permukaan, dan sifat optik material (DeVito & Drysdale, 2022; Fahad et al., 2021; Leprince-Wang et al., 2023).

Hasil analisis **X-ray Diffraction (XRD)** menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis memiliki puncak difraksi utama pada sudut 2θ sekitar **31° , 34° , dan 36°** , yang masing-masing dapat diindeks sebagai bidang kristal **(100)**, **(002)**, dan **(101)** dari struktur heksagonal **wurtzite ZnO** (Samanta, 2020). Pola difraksi tersebut sesuai dengan standar **JCPDS No. 36-1451**, sehingga mengonfirmasi bahwa material yang terbentuk merupakan fase ZnO dengan struktur kristal wurtzite. Tidak ditemukannya puncak difraksi lain yang berkaitan dengan fase sekunder maupun senyawa pengotor menunjukkan bahwa proses sintesis melalui metode **sol-gel** berlangsung dengan baik dan menghasilkan material dengan kemurnian fase yang tinggi. Kemurnian kristal ini menjadi faktor penting karena keberadaan fase pengotor dapat mengganggu sifat elektronik, mengubah jalur rekombinasi pembawa muatan, dan pada akhirnya memengaruhi respons fotoluminesensi ZnO (Nadupalli et al., 2021; Samanta, 2020). Hasil tersebut juga mendukung bahwa struktur kristal yang diperoleh telah memenuhi karakteristik dasar ZnO yang diperlukan untuk aplikasi sensor optik berbasis fotoluminesensi.



Gambar 1 Difraktogram aglomerat ZnO hasil sintesis

Pola difraksi yang tajam dengan intensitas puncak yang tinggi menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis memiliki tingkat kristalinitas yang baik. Karakteristik ini mencerminkan keteraturan susunan atom dalam kisi kristal serta rendahnya cacat struktural berskala makro, sehingga proses sintesis melalui metode *sol-gel* berhasil menghasilkan kristal ZnO yang berkembang dengan baik (Janotti & Walle, 2006; Samanta, 2020; Zhou et al., 2020). Kristalinitas yang tinggi merupakan salah satu faktor penting yang menentukan kualitas material semikonduktor karena berpengaruh langsung terhadap sifat elektronik dan optiknya (Agarwal et al., 2019; Lv et al., 2019).

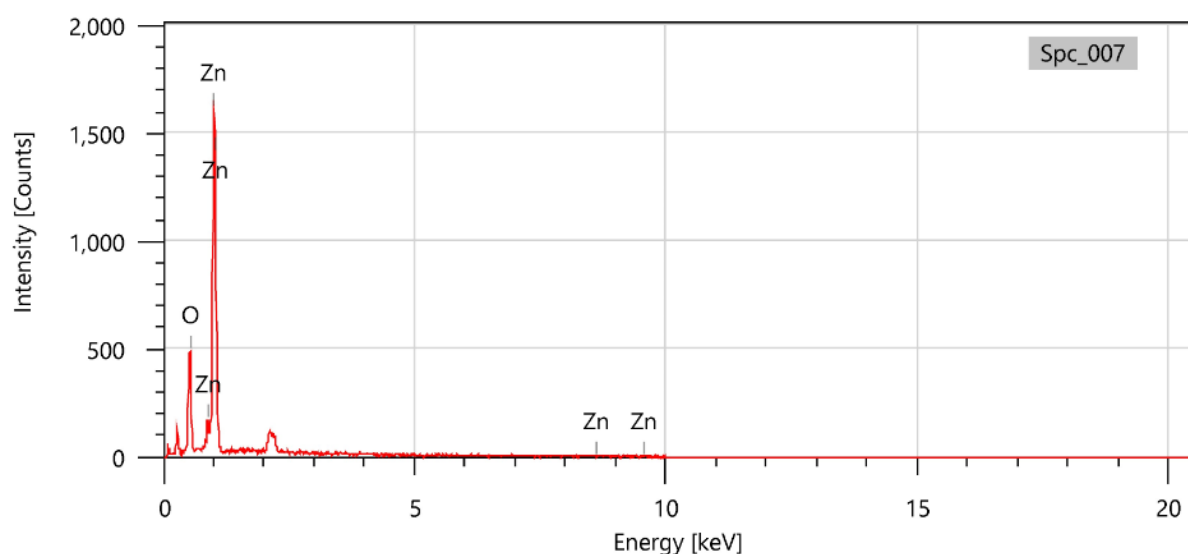
Pada material semikonduktor seperti ZnO, struktur kristal yang lebih teratur dapat meningkatkan mobilitas pembawa muatan dengan mengurangi hamburan elektron akibat ketidakteraturan kisi kristal. Kondisi ini juga menekan terjadinya rekombinasi non-radiatif yang umumnya disebabkan oleh cacat struktural, sehingga rekombinasi elektron-hole lebih banyak berlangsung melalui jalur radiatif. Akibatnya, efisiensi emisi fotoluminesensi meningkat dan respons optik material menjadi lebih baik (Cabral et al., 2020; Pal et al., 2016; Wolf et al., 2024).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai laporan yang menyebutkan bahwa struktur kristal heksagonal **wurtzite** merupakan fase ZnO yang paling stabil dan paling banyak dimanfaatkan pada aplikasi optoelektronik. Struktur ini memiliki pita energi yang tersusun dengan baik (*well-defined band structure*) sehingga mendukung pembentukan eksiton yang stabil serta menghasilkan emisi fotoluminesensi yang khas, baik pada daerah ultraviolet (*near-band-edge*

emission) maupun daerah tampak yang berkaitan dengan cacat intrinsik di dalam kristal (Leprince-Wang et al., 2023; Lv et al., 2019; Zhou et al., 2020). Oleh karena itu, terbentuknya fase wurtzite dengan kristalinitas yang tinggi pada penelitian ini menjadi dasar penting yang mendukung pemanfaatan ZnO sebagai material aktif pada sensor optik berbasis emisi cahaya. Hasil karakterisasi **Energy Dispersive X-ray (EDX)** pada Gambar 2 dan Tabel 1 semakin memperkuat temuan tersebut. Spektrum EDX menunjukkan bahwa material didominasi oleh unsur Zn dan O tanpa adanya unsur pengotor yang signifikan. Komposisi atom Zn sekitar **49%** dan O sekitar **51%** mendekati rasio stoikiometri ideal ZnO, yang menunjukkan bahwa proses sintesis melalui metode *sol-gel* berlangsung dengan baik dan menghasilkan material dengan komposisi kimia yang sesuai (Simsek et al., 2020). Konsistensi antara hasil EDX dan pola difraksi XRD yang hanya menunjukkan fase tunggal ZnO memberikan bukti bahwa nanopartikel yang diperoleh memiliki kemurnian fase sekaligus kemurnian komposisi yang tinggi. Dengan demikian, respons fotoluminesensi yang diamati pada penelitian ini dapat dihubungkan dengan sifat intrinsik ZnO, bukan dipengaruhi oleh keberadaan fase sekunder maupun kontaminan eksternal (Agarwal et al., 2019; Simsek et al., 2020).

Tabel 1 hasil EDX aglomerat ZnO nanopartikel

Element	Line	Mass%	Atom%
O	K	20.47±0.36	51.25±0.89
Zn	L	79.53±0.90	48.75±0.55
Total		100.00	100.00
Spc_007		Fitting ratio 0.1273	



Gambar 2 Hasil citra EDX aglomerat ZnO nanopartikel hasil sintesis

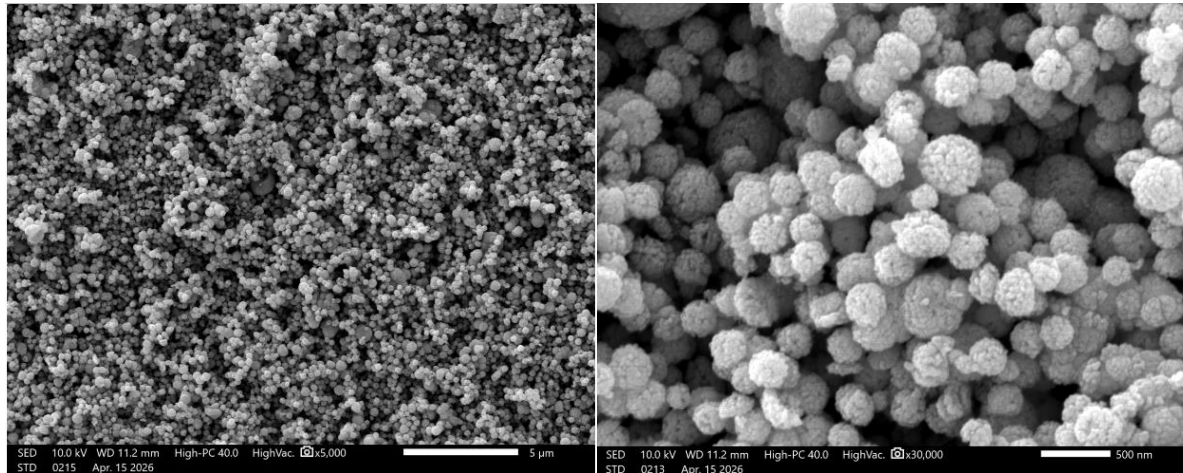
Hasil pengamatan menggunakan **Scanning Electron Microscopy (SEM)** pada Gambar 3 menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki morfologi yang tidak beraturan dengan ukuran partikel berada pada rentang nano hingga submikrometer. Sebagian besar partikel tampak mengalami **aglomerasi**, yaitu berkumpul membentuk kelompok partikel yang lebih besar. Fenomena ini umum dijumpai pada nanopartikel ZnO hasil sintesis **sol-gel** karena proses hidrolisis, kondensasi, dan pertumbuhan kristal berlangsung hampir secara bersamaan sehingga ukuran partikel yang dihasilkan tidak sepenuhnya seragam (Samanta, 2020). Selain itu, tingginya energi permukaan nanopartikel dan gaya tarik **van der Waals** mendorong partikel saling mendekat selama proses pengeringan maupun kalsinasi, sehingga terbentuk aglomerat yang stabil (Agarwal et al., 2019; Mudassar et al., 2025).

Meskipun aglomerasi sering dianggap sebagai keterbatasan dalam pengendalian morfologi, kondisi tersebut tidak selalu memberikan dampak negatif terhadap performa material. Pada aplikasi sensor berbasis adsorpsi, keberadaan batas antarpartikel (*inter-particle boundaries*) dan kontak antarkristal justru dapat menyediakan lebih banyak situs aktif yang berpotensi meningkatkan interaksi antara permukaan ZnO dan ion logam. Dengan demikian, morfologi yang teramati pada penelitian ini masih mendukung proses adsorpsi Pb^{2+} , terutama karena interaksi awal berlangsung pada permukaan partikel dan daerah antarmuka yang memiliki energi permukaan lebih tinggi (Leprince-Wang et al., 2023; Mishra et al., 2024).

Selain dipengaruhi oleh proses sintesis, ukuran partikel yang bervariasi juga menunjukkan bahwa pertumbuhan kristal belum berlangsung secara homogen. Variasi ukuran ini merupakan karakteristik yang umum pada nanopartikel hasil metode **sol-gel**, terutama ketika laju nukleasi dan pertumbuhan kristal tidak sepenuhnya seimbang. Walaupun demikian, morfologi yang diperoleh masih sesuai dengan karakteristik ZnO yang banyak dilaporkan pada penelitian terdahulu dan tetap mampu memberikan luas permukaan efektif yang cukup besar untuk mendukung proses adsorpsi serta transfer muatan pada permukaan material (Mozhiarasi et al., 2022; Samanta, 2020).

Temuan tersebut juga konsisten dengan hasil karakterisasi **PSA** yang menunjukkan ukuran hidrodinamik lebih besar dibandingkan ukuran morfologi yang diamati melalui SEM. Perbedaan ini menunjukkan bahwa partikel ZnO mengalami aglomerasi ketika berada dalam medium cair, sedangkan SEM menggambarkan bentuk partikel pada kondisi kering. Oleh karena itu, kedua hasil karakterisasi tersebut saling melengkapi dan memberikan gambaran

yang lebih menyeluruh mengenai perilaku morfologi nanopartikel ZnO, baik dalam keadaan padat maupun saat terdispersi dalam larutan.



Gambar 3 Hasil SEM aglomerat nanopartikel ZnO hasil sintesis

Permukaan ZnO yang memiliki banyak cacat kristal (*defect*) dan situs aktif berperan penting dalam proses adsorpsi serta transfer muatan. Kedua karakteristik tersebut dapat memengaruhi respons optik material ketika berinteraksi dengan ion logam (Cabral et al., 2020) (Janotti & de Walle, 2009). Oleh karena itu, hasil sintesis ZnO pada penelitian ini menunjukkan karakteristik yang mendukung pengembangannya sebagai material sensor optik untuk mendeteksi ion logam berat (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014).

Morfologi nanopartikel ZnO yang diperoleh juga diperkirakan memiliki luas permukaan yang cukup tinggi. Meskipun nilai luas permukaan secara kuantitatif umumnya ditentukan menggunakan analisis Brunauer–Emmett–Teller (BET), penelitian ini menggunakan **Particle Size Analyzer (PSA)** (Filippov et al., 2023) untuk mengevaluasi ukuran partikel dalam medium cair. Hasil PSA menunjukkan bahwa partikel mengalami aglomerasi sehingga memiliki ukuran hidrodinamik yang lebih besar. Kondisi ini merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada nanopartikel ZnO hasil sintesis metode sol–gel dan tidak serta-merta menghilangkan sifat nanomaterialnya (Bhattacharjee, 2016).

Meskipun terjadi aglomerasi, ukuran partikel yang masih berada pada skala nano hingga submikron tetap memberikan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi. Karakteristik ini memungkinkan tersedianya lebih banyak situs aktif pada permukaan ZnO untuk berinteraksi dengan ion logam. Dengan demikian, nanopartikel ZnO hasil sintesis dalam

penelitian ini diperkirakan masih memiliki kemampuan yang baik dalam mengadsorpsi ion logam berat, sehingga berpotensi mendukung peningkatan respons optik yang diamati selama pengujian (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014; Meyer & Marx, 2003).

Morfologi yang diamati mengindikasikan potensi luas permukaan spesifik yang relatif tinggi, yang merupakan parameter penting dalam aplikasi optik dan adsorpsi. Luas permukaan yang besar memungkinkan peningkatan jumlah situs aktif pada permukaan material, sehingga dapat meningkatkan interaksi dengan molekul atau ion di sekitarnya. Namun demikian, analisis kuantitatif menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET) tetap diperlukan untuk mengonfirmasi nilai luas permukaan secara akurat dan menghindari interpretasi yang bersifat asertif.

Meskipun tidak dilakukan karakterisasi BET, hasil uji aplikasi pada sediaan jamu kunyit asam menunjukkan adanya respons optik berupa perpendaran di bawah sinar UV. Fenomena ini mengindikasikan bahwa nanopartikel ZnO masih memiliki situs aktif permukaan yang efektif dalam berinteraksi dengan komponen dalam matriks herbal. Secara fundamental, interaksi ini dapat dikaitkan dengan keberadaan defect states dan gugus permukaan seperti –OH yang berperan dalam proses adsorpsi dan transfer muatan, sehingga memodulasi respons fotoluminesensi material (Krasovska et al., 2018), meskipun spektrum fotoluminesensi langsung tidak diperoleh, perilaku emisi optik yang diamati konsisten dengan mekanisme emisi yang dimediasi oleh cacat yang banyak dilaporkan dalam sistem ZnO

Hal ini diperkuat oleh hasil analisis EDX yang menunjukkan bahwa material tersusun dominan oleh unsur Zn dan O tanpa adanya kontaminan signifikan. Kemurnian komposisi ini menjadi faktor penting karena keberadaan impuritas dapat bertindak sebagai pusat rekombinasi non-radiatif yang menurunkan efisiensi emisi optik. Dengan demikian, permukaan ZnO yang relatif bersih memungkinkan interaksi optik yang lebih optimal serta meningkatkan sensitivitas terhadap lingkungan sekitar.

Selain itu, partikel ZnO yang teramati memiliki ukuran dalam rentang submikron (~500 nm), yang kemungkinan besar merupakan hasil aglomerasi dari kristalit ZnO berukuran nano. Fenomena ini sejalan dengan laporan literatur bahwa nanopartikel ZnO cenderung membentuk agregat sekunder akibat instabilitas termodinamika pada skala nano, di mana sistem berusaha mencapai kondisi energi minimum melalui penggabungan partikel-partikel kecil (Mudassar et al., 2025). Implikasi dari kondisi ini adalah adanya kompromi antara

peningkatan luas permukaan dan penurunan homogenitas morfologi, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi performa optik dan aplikasi sensorik material.

Hasil analisis **Energy Dispersive X-ray (EDX)** menunjukkan bahwa material hasil sintesis didominasi oleh unsur seng (Zn) dan oksigen (O), tanpa terdeteksi adanya unsur pengotor dalam jumlah yang signifikan. Komposisi atom Zn sekitar **49%** dan O sekitar **51%** mendekati rasio stoikiometri ideal ZnO, yang menunjukkan bahwa proses sintesis menggunakan metode **sol-gel** berlangsung dengan baik dan berhasil menghasilkan material dengan komposisi kimia yang sesuai. Kesesuaian komposisi ini penting karena kemurnian material sangat berpengaruh terhadap sifat semikonduktor dan respons optik ZnO (Janotti & de Walle, 2009; Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014).

Selain itu, hasil EDX yang diperoleh dari beberapa titik pengamatan menunjukkan komposisi unsur yang relatif seragam. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi Zn dan O pada seluruh permukaan material cukup homogen. Homogenitas komposisi merupakan salah satu faktor penting karena dapat menghasilkan struktur kristal yang lebih seragam, sehingga proses perpindahan elektron dan rekombinasi pasangan elektron-hole dapat berlangsung lebih stabil. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap konsistensi respons optik ZnO ketika berinteraksi dengan ion logam (Fan et al., 2013; Özgür et al., 2005; Wang et al., 2020; Zhu & Wang, 2025).

Menariknya, spektrum EDX juga tidak menunjukkan keberadaan unsur lain, seperti karbon (C) maupun nitrogen (N), yang umumnya berasal dari sisa prekursor organik selama proses sintesis. Hasil ini mengindikasikan bahwa proses kalsinasi telah berlangsung secara efektif sehingga residu organik berhasil dihilangkan. Keberadaan residu karbon diketahui dapat mengganggu pembentukan kristal ZnO, menurunkan kemurnian fase, serta membentuk pusat rekombinasi non-radiatif (*non-radiative recombination centers*) yang berpotensi mengurangi intensitas emisi fotoluminesensi (Janotti & de Walle, 2009; Look, 2001).

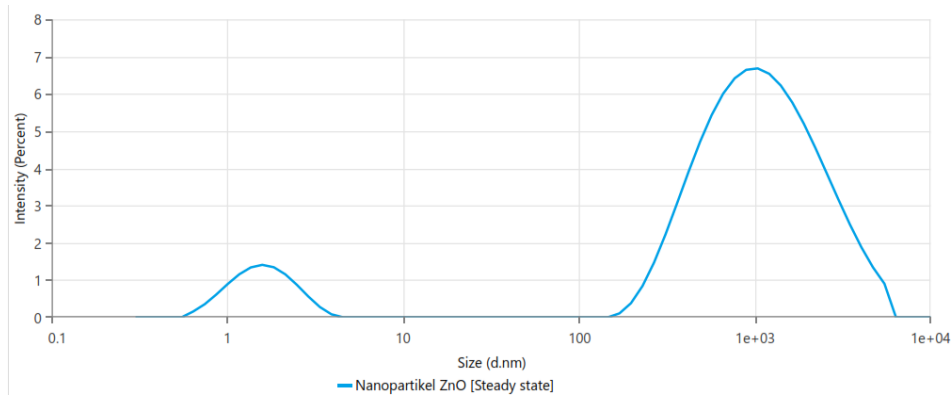
Secara keseluruhan, hasil EDX memperkuat temuan dari analisis XRD dan FTIR bahwa nanopartikel ZnO yang dihasilkan memiliki komposisi kimia yang baik, kemurnian fase yang tinggi, serta distribusi unsur yang homogen. Karakteristik tersebut menjadi dasar yang penting dalam mendukung mekanisme interaksi antara permukaan ZnO dan ion Pb^{2+} , sehingga material yang diperoleh berpotensi memberikan respons optik yang stabil ketika diaplikasikan sebagai sensor sederhana pada matriks jamu.

Kemurnian komposisi ZnO yang ditunjukkan oleh hasil EDX memperkuat dugaan bahwa respons optik yang diamati berasal dari karakteristik intrinsik material, bukan akibat adanya kontaminan dari unsur lain. Dengan kata lain, fenomena pendaran yang muncul lebih berkaitan dengan sifat semikonduktor ZnO, seperti transisi pita energi (*band-to-band transition*) dan emisi yang dipengaruhi oleh cacat kristal (*defect states*), terutama *oxygen vacancies* dan *zinc interstitials* (Janotti & Walle, 2006; Mudassar et al., 2025). Oleh karena itu, hasil EDX memberikan bukti bahwa sifat optik yang diamati dalam penelitian ini dapat dikaitkan secara langsung dengan nanopartikel ZnO yang berhasil disintesis, bukan dipengaruhi oleh keberadaan pengotor atau residu dari proses sintesis. Temuan ini juga sejalan dengan berbagai penelitian yang melaporkan bahwa tingkat kemurnian material dan jenis cacat intrinsik pada kisi kristal merupakan faktor utama yang menentukan intensitas serta karakter emisi optik ZnO (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014; Özgür et al., 2005)

Untuk melengkapi karakterisasi material, dilakukan analisis menggunakan **Particle Size Analyzer (PSA)** berbasis **Dynamic Light Scattering (DLS)** guna mengetahui perilaku nanopartikel ketika terdispersi dalam medium cair. Berbeda dengan SEM yang mengamati morfologi partikel pada kondisi kering, DLS mengukur ukuran hidrodinamik (*hydrodynamic diameter*), yaitu ukuran partikel beserta lapisan solvasi dan agregat yang terbentuk selama berada dalam suspensi (Bhattacharjee, 2016; Sasmal & Bhattacharyya, 2023; Stetefeld et al., 2016). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki nilai **Z-average sebesar 742,6 nm** dengan **Polydispersity Index (PDI) sebesar 0,37**, yang termasuk dalam kategori **moderately polydisperse** (Gambar 4). Nilai tersebut menunjukkan bahwa partikel memiliki distribusi ukuran yang cukup beragam dan masih mengalami aglomerasi, suatu kondisi yang umum dijumpai pada nanopartikel ZnO hasil sintesis metode **sol-gel**.

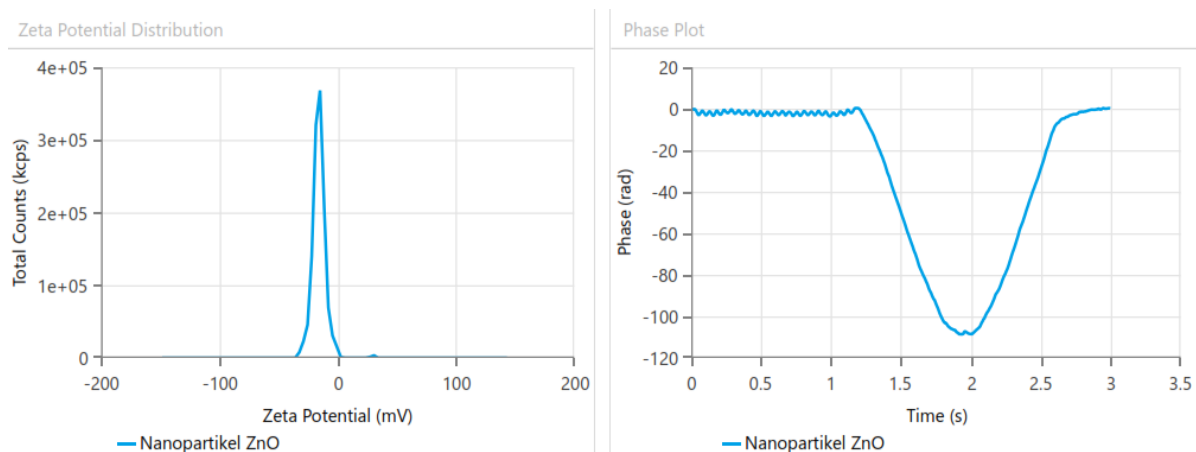
Meskipun ukuran hidrodinamik yang diperoleh melalui PSA lebih besar dibandingkan ukuran morfologi yang diamati menggunakan SEM, kedua hasil tersebut tidak saling bertentangan. Perbedaan ini terjadi karena DLS mengukur perilaku partikel dalam suspensi, sedangkan SEM hanya menggambarkan ukuran partikel setelah sampel dikeringkan. Dengan demikian, data PSA memberikan informasi yang lebih mendekati kondisi sebenarnya ketika nanopartikel ZnO diaplikasikan dalam sistem cair, seperti pada pengujian interaksi dengan ion Pb^{2+} dalam matriks jamu. Selain itu, ukuran hidrodinamik dan tingkat aglomerasi yang diperoleh dari PSA turut memengaruhi luas permukaan efektif (*effective surface area*) yang

tersedia untuk proses adsorpsi serta transfer muatan. Oleh karena itu, hasil PSA menjadi pendukung penting dalam menjelaskan mekanisme interaksi ZnO dengan ion Pb^{2+} yang selanjutnya berkontribusi terhadap peningkatan respons optik material (Bhattacharjee, 2016; Stetefeld et al., 2016).



Gambar 4 Distribusi diameter ukuran nanopartikel

Ukuran hidrodinamik yang berada pada kisaran submikron tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis masih mengalami proses aglomerasi selama berada dalam suspensi. Fenomena ini sangat sesuai dengan hasil citra SEM yang memperlihatkan adanya agregasi partikel akibat tingginya energi permukaan dan gaya tarik van der Waals antarnanopartikel. Dengan demikian, data PSA tidak bertentangan dengan hasil SEM, tetapi justru saling melengkapi dalam menjelaskan bahwa material yang dihasilkan tersusun atas kristalit ZnO berukuran nano yang bergabung membentuk agregat sekunder di dalam medium cair. Kondisi seperti ini telah banyak dilaporkan pada nanopartikel ZnO hasil sintesis metode sol–gel dan tidak menghilangkan karakteristik nanostruktur materialnya (Bhattacharjee, 2016; iTeh Standard Preview, 2017).



Gambar 5 Zeta Potensial untuk nanopartikel ZnO

Selain ukuran partikel, karakterisasi menggunakan **zeta potential** dilakukan untuk mengetahui sifat muatan permukaan serta stabilitas dispersi nanopartikel ZnO dalam medium cair. Hasil pengukuran menunjukkan nilai rata-rata zeta potential sebesar **-15,84 mV** (Gambar 5), yang mengindikasikan bahwa permukaan nanopartikel bermuatan negatif dengan tingkat stabilitas dispersi yang tergolong rendah hingga sedang. Nilai ini menunjukkan bahwa gaya tolak elektrostatis antarpartikel belum cukup besar untuk sepenuhnya mencegah terjadinya aglomerasi, sehingga hasil tersebut konsisten dengan distribusi ukuran partikel yang diperoleh melalui PSA maupun morfologi agregat yang diamati pada citra SEM (Bhattacharjee, 2016; Stetefeld et al., 2016). Kondisi tersebut merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada nanopartikel ZnO hasil sintesis metode **sol-gel**, terutama setelah proses kalsinasi, karena tingginya energi permukaan mendorong partikel untuk saling berinteraksi dan membentuk agregat (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014).

Meskipun demikian, nilai zeta potential yang relatif rendah tidak menunjukkan bahwa nanopartikel kehilangan aktivitas permukaannya. Sebaliknya, muatan negatif pada permukaan ZnO mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil (Zn-OH) dan spesies oksigen permukaan (Zn-O^-) yang telah terkonfirmasi melalui analisis FTIR. Gugus-gugus tersebut berfungsi sebagai situs aktif yang berperan penting dalam proses adsorpsi ion logam. Ketika nanopartikel ZnO berada dalam larutan yang mengandung ion Pb^{2+} , gaya tarik elektrostatis menjadi tahap awal yang memfasilitasi pendekatan ion menuju permukaan material. Selanjutnya, interaksi berkembang menjadi pembentukan ikatan koordinasi (*surface complexation* atau *chemisorption*) antara ion Pb^{2+} dan gugus hidroksil pada permukaan ZnO,

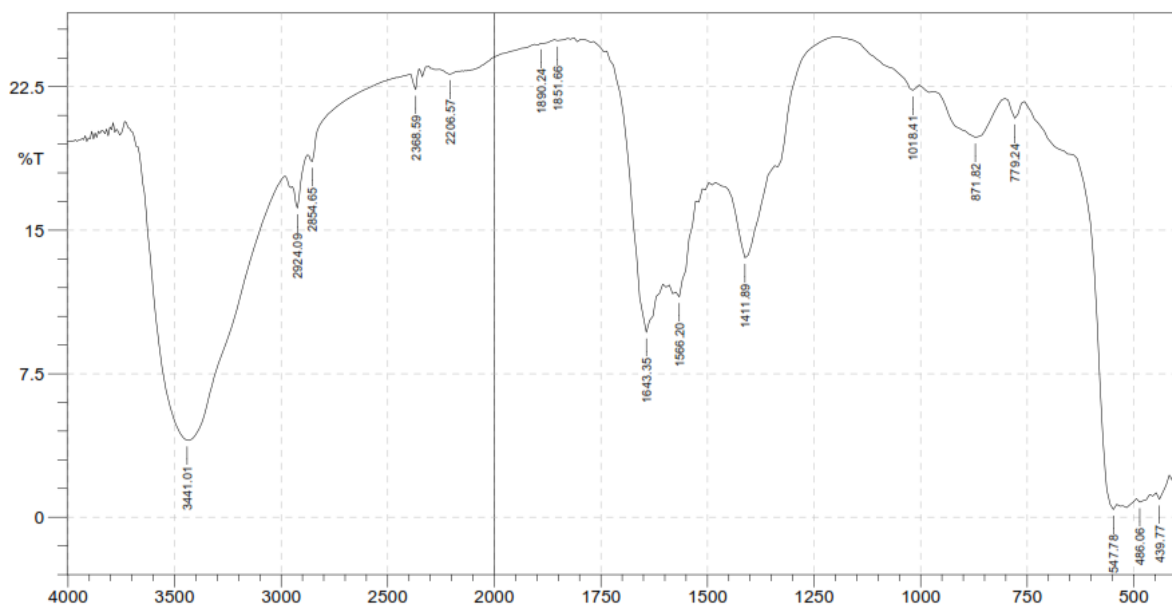
sehingga menghasilkan adsorpsi yang lebih stabil (Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014; Meyer & Marx, 2003).

Mekanisme tersebut memberikan penjelasan yang logis terhadap peningkatan respons optik yang diamati pada penelitian ini. Ketika ion Pb^{2+} berinteraksi dengan permukaan ZnO, proses adsorpsi diperkirakan tidak hanya terjadi melalui gaya tarik elektrostatik, tetapi juga melibatkan interaksi dengan gugus hidroksil permukaan serta situs cacat kristal (*defect sites*), terutama *oxygen vacancies*. Interaksi tersebut dapat mengubah distribusi muatan pada permukaan ZnO dan memengaruhi tingkat energi cacat yang berperan sebagai pusat rekombinasi radiatif. Akibatnya, peluang rekombinasi elektron-hole meningkat sehingga intensitas emisi fotoluminesensi ZnO menjadi lebih tinggi ketika disinari sinar UV. Fenomena ini telah banyak dilaporkan pada material semikonduktor berbasis ZnO, di mana adsorpsi ion logam mampu memodulasi sifat elektronik permukaan dan menghasilkan perubahan intensitas emisi optik (Fan et al., 2013; Gusatti et al., 2011; Klingshirn, 2007; Look, 2001; Wang et al., 2020).

Dengan demikian, hasil pengukuran zeta potential tidak hanya menjelaskan karakteristik dispersi nanopartikel, tetapi juga memberikan dukungan terhadap mekanisme adsorpsi Pb^{2+} yang diusulkan pada penelitian ini. Hubungan antara muatan permukaan, keberadaan gugus hidroksil, dan cacat kristal menunjukkan bahwa permukaan ZnO memiliki kondisi yang sesuai untuk memfasilitasi interaksi dengan ion Pb^{2+} . Interaksi tersebut selanjutnya memengaruhi sifat optoelektronik material, yang tercermin dari meningkatnya intensitas pendaran pada matriks jamu kunyit asam setelah penyinaran menggunakan sinar UV. Temuan ini memperkuat potensi nanopartikel ZnO sebagai material sensor optik sederhana untuk mendeteksi logam berat dalam sistem herbal yang kompleks.

Hasil karakterisasi **Fourier Transform Infrared (FTIR)** pada Gambar 6 semakin memperkuat terbentuknya nanopartikel ZnO secara kimiawi. Spektrum FTIR memperlihatkan pita serapan yang kuat pada daerah bilangan gelombang sekitar **400–600 cm^{-1}** , yang merupakan karakteristik vibrasi peregangan (*stretching vibration*) ikatan **Zn–O**. Munculnya pita serapan pada daerah ini menunjukkan bahwa proses sintesis melalui metode **sol-gel** telah berhasil membentuk jaringan oksida logam ZnO dengan baik. Daerah serapan tersebut secara luas dikenal sebagai **fingerprint** ZnO dan telah dilaporkan secara konsisten pada berbagai penelitian mengenai material semikonduktor berbasis oksida logam (Arciniegas-Grijalba et al., 2017; Kołodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014; Pil et al., 2009; Sasmal & Bhattacharyya, 2023).

Selain mengonfirmasi pembentukan ZnO, hasil FTIR juga memberikan informasi mengenai kondisi kimia permukaan nanopartikel yang berperan penting dalam proses adsorpsi ion logam. Oleh karena itu, karakterisasi FTIR tidak hanya berfungsi sebagai bukti keberhasilan sintesis, tetapi juga menjadi dasar untuk memahami mekanisme interaksi antara permukaan ZnO dan ion Pb^{2+} yang akan dibahas pada bagian berikutnya.



Gambar 6 Spektra FTIR aglomerat ZnO nanopartikel hasil sintesis

Selain pita vibrasi Zn–O, spektrum FTIR juga memperlihatkan pita serapan yang lebar pada sekitar **3400 cm⁻¹** dan pita pada sekitar **1600 cm⁻¹**. Kedua pita tersebut masing-masing berkaitan dengan vibrasi peregangan (*stretching*) gugus hidroksil (–OH) dan vibrasi pembengkokan (*bending*) molekul air yang teradsorpsi pada permukaan ZnO. Keberadaan gugus hidroksil menunjukkan bahwa permukaan nanopartikel telah mengalami hidroksilasi (*surface hydroxylation*), suatu kondisi yang umum terjadi pada oksida logam berukuran nano dan berperan penting dalam menentukan reaktivitas permukaan (Ayub et al., 2021; Strunk et al., 2009).

Pada material ZnO, gugus hidroksil bukan hanya berfungsi sebagai penanda keberadaan air teradsorpsi, tetapi juga menjadi situs aktif yang mengendalikan proses interaksi dengan ion logam. Dalam medium berair, sebagian gugus **Zn–OH** dapat mengalami deprotonasi membentuk spesies **Zn–O⁻**, sehingga menghasilkan permukaan bermuatan negatif yang lebih mudah berinteraksi dengan ion logam bermuatan positif, termasuk Pb²⁺. Tahap awal interaksi umumnya diawali oleh gaya tarik elektrostatik (*physisorption*), kemudian berkembang menjadi pembentukan kompleks permukaan (*surface complexation*) melalui

ikatan koordinasi **Zn–O–Pb**, yang menunjukkan terjadinya adsorpsi kimia (*chemisorption*) dengan kestabilan yang lebih tinggi (Venema et al., 1996; Zheng et al., 2021).

Mekanisme tersebut menunjukkan bahwa gugus hidroksil memiliki peran yang jauh lebih penting daripada sekadar gugus fungsi permukaan. Gugus ini menjadi pusat reaksi yang menghubungkan struktur kimia ZnO dengan kemampuan material dalam mengadsorpsi ion Pb^{2+} . Oleh karena itu, keberadaan pita serapan pada **3400 cm^{-1}** dan **1600 cm^{-1}** tidak hanya mengonfirmasi karakteristik kimia permukaan ZnO, tetapi juga memberikan dasar yang kuat untuk menjelaskan tingginya afinitas nanopartikel terhadap ion logam berat.

Hasil FTIR tersebut selaras dengan karakterisasi XRD, EDX, SEM, PSA, dan zeta potential yang menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO memiliki struktur kristal yang baik, komposisi yang homogen, serta permukaan aktif yang mendukung proses adsorpsi. Integrasi seluruh hasil karakterisasi tersebut memperkuat hipotesis bahwa peningkatan emisi optik yang diamati pada penelitian ini berkaitan dengan adsorpsi Pb^{2+} pada situs aktif permukaan ZnO. Interaksi tersebut diperkirakan memodulasi distribusi muatan dan *defect states* di sekitar permukaan material, sehingga meningkatkan rekombinasi elektron–hole secara radiatif dan menghasilkan intensitas fotoluminesensi yang lebih tinggi ketika disinari sinar UV.

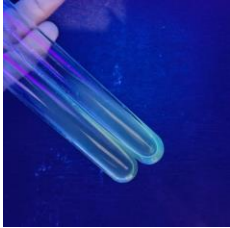
Ion Pb^{2+} memiliki afinitas yang tinggi terhadap permukaan ZnO sehingga mudah berinteraksi dengan situs aktif yang tersedia, seperti gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan cacat permukaan (*surface defects*). Ketika nanopartikel ZnO disinari sinar UV, elektron akan tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron–hole. Ion Pb^{2+} yang teradsorpsi kemudian berinteraksi dengan elektron pada permukaan ZnO dan memengaruhi distribusi muatan lokal. Perubahan ini menyebabkan proses rekombinasi elektron–hole berlangsung berbeda dibandingkan sebelum adsorpsi, sehingga menghasilkan perubahan intensitas emisi fotoluminesensi yang diamati pada penelitian ini (Armaković et al., 2025; Khashij et al., 2022; Preeti & Sharma, 2026; Shakir et al., 2024; Vatsa et al., 2026; Zhu & Wang, 2025). Mekanisme serupa juga telah dilaporkan pada berbagai material semikonduktor oksida yang menunjukkan bahwa adsorpsi ion logam dapat mengubah sifat elektronik permukaan dan respons optiknya (Klingshirn, 2007; Pearton et al., 2005).

Selain memengaruhi distribusi muatan, adsorpsi Pb^{2+} juga diperkirakan mengubah kondisi *defect states* pada ZnO, terutama *oxygen vacancies* yang berperan sebagai pusat emisi (*emission centers*). Keberadaan ion Pb^{2+} di sekitar situs cacat dapat meningkatkan peluang rekombinasi elektron–hole melalui jalur radiatif (*defect-mediated photoluminescence*),

sehingga intensitas emisi tampak lebih tinggi ketika material disinari sinar UV. Fenomena ini menunjukkan bahwa sifat optik ZnO sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan dan keberadaan cacat intrinsik, sehingga perubahan kecil akibat adsorpsi ion logam dapat menghasilkan respons optik yang terukur (Hou et al., 2021; Reynolds et al., 1999; Vanheusden et al., 1997; Zhu & Wang, 2025).

Hasil tersebut sejalan dengan pengamatan pada matriks jamu kunyit asam, di mana nanopartikel ZnO menghasilkan pendaran putih yang lebih terang setelah berinteraksi dengan ion Pb^{2+} . Respons ini menunjukkan bahwa ion Pb^{2+} tidak hanya teradsorpsi pada permukaan ZnO, tetapi juga memodulasi sifat opto-elektronik material melalui perubahan distribusi muatan dan tingkat energi cacat. Dengan demikian, ion Pb^{2+} berperan sebagai *surface modulator* yang meningkatkan efisiensi rekombinasi radiatif dan memperkuat emisi fotoluminesensi (Chowdhury, 2022; Preeti & Sharma, 2026; Thi et al., 2019).

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD, SEM, EDX, FTIR, PSA, dan zeta potential saling mendukung dalam menjelaskan mekanisme respons optik ZnO terhadap ion Pb^{2+} . Struktur kristal wurtzite yang baik, kemurnian fase yang tinggi, morfologi partikel dengan luas permukaan efektif, keberadaan gugus hidroksil aktif, serta karakteristik muatan permukaan memberikan kondisi yang ideal untuk proses adsorpsi dan transfer muatan. Berdasarkan seluruh hasil tersebut, mekanisme yang diusulkan dalam penelitian ini meliputi tiga tahapan utama, yaitu **(1)** adsorpsi awal Pb^{2+} pada situs aktif permukaan ZnO melalui interaksi elektrostatik dan pembentukan kompleks permukaan, **(2)** modulasi *defect states*, khususnya *oxygen vacancies*, dan **(3)** peningkatan rekombinasi elektron–hole secara radiatif yang menghasilkan intensifikasi emisi cahaya di bawah iradiasi UV. Temuan ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis tidak hanya memiliki karakteristik struktur dan kimia yang baik, tetapi juga mampu mempertahankan respons optiknya pada matriks herbal yang kompleks. Oleh karena itu, material ini berpotensi dikembangkan sebagai platform sensor optik sederhana untuk mendeteksi ion Pb^{2+} pada sampel herbal nyata (*real sample*), sehingga memperluas peluang penerapan ZnO di bidang analisis farmasi dan keamanan bahan alam.

 Jamu A murni sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO dengan UV 366	 Jamu A 5 ppm sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO dengan UV 366	 Jamu A 10 ppm sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO dengan UV 254
 Jamu A 20 ppm sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO dengan UV 366	 Perbandingan Jamu A dengan berbagai Variasi ppm pada UV 366	 Jamu B Murni sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO pada UV 366
 Jamu B 5 ppm sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO pada UV 366	 Jamu B 10 ppm sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO pada UV 366	 Jamu A 20 ppm sebelum dan sesudah diberi Nanopartikel ZnO dengan UV 366

Pengamatan visual pada Gambar X menunjukkan adanya perubahan intensitas emisi pada sampel jamu kunyit asam setelah penambahan Pb^{2+} dan nanopartikel ZnO di bawah penyinaran UV 366 nm. Pada sampel D dan E, yang sejak kondisi awal menunjukkan pendaran lebih kuat dibandingkan sampel lainnya, penambahan Pb^{2+} menghasilkan emisi yang lebih jelas dibandingkan kondisi tanpa penambahan Pb. Pola tersebut juga terlihat pada pengujian seluruh sampel, di mana peningkatan konsentrasi Pb dari 5 hingga 20 ppm diikuti oleh perubahan respons visual dari redup atau nyala menjadi lebih terang. Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan Pb^{2+} berkaitan dengan peningkatan respons optik sistem ZnO dalam matriks herbal. Secara material, respons tersebut dapat dikaitkan dengan kemampuan ZnO

menghasilkan emisi intrinsik akibat eksitasi UV dan sensitivitas emisi terhadap kondisi permukaan serta *defect states*. Studi terbaru menunjukkan bahwa *oxygen vacancies* dan *zinc interstitials* pada ZnO dapat berkontribusi terhadap emisi tampak dan perubahan sifat luminesensi material. Selain itu, penelitian pada *Analytical Chemistry* menunjukkan bahwa keberadaan *oxygen vacancies* pada nanopartikel ZnO memiliki hubungan langsung dengan respons luminesensi, sehingga perubahan lingkungan kimia permukaan berpotensi memengaruhi intensitas emisi. Oleh karena itu, peningkatan pendaran setelah penambahan Pb^{2+} pada penelitian ini secara rasional dapat dipandang sebagai indikasi bahwa interaksi Pb^{2+} dengan permukaan ZnO memodulasi proses transfer dan rekombinasi pembawa muatan. Namun demikian, karena ZnO juga menunjukkan pendaran tanpa Pb dan matriks jamu memiliki komponen optik yang kompleks, hasil visual ini sebaiknya diposisikan sebagai **respons optik kualitatif terhadap Pb^{2+}** , bukan sebagai bukti tunggal untuk menentukan kadar Pb secara kuantitatif.

KESIMPULAN

Karakterisasi dilakukan menggunakan X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray (EDX), Fourier Transform Infrared (FTIR), Particle Size Analyzer (PSA), dan zeta potential. Hasil XRD menunjukkan terbentuknya fase heksagonal wurtzite ZnO dengan kristalinitas yang baik, sedangkan SEM menunjukkan morfologi partikel yang cenderung beragregasi. Analisis EDX menunjukkan dominasi Zn dan O dengan komposisi atom masing-masing sekitar 49% dan 51%. Analisis PSA-DLS menghasilkan Z-average sebesar 742,6 nm dan PDI 0,37, sedangkan zeta potential sebesar $-15,84$ mV menunjukkan kecenderungan stabilitas dispersi yang rendah hingga sedang. FTIR mengonfirmasi keberadaan ikatan Zn–O dan gugus hidroksil pada permukaan. Pengujian menggunakan UV menunjukkan peningkatan pendaran setelah penambahan Pb^{2+} pada konsentrasi 5, 10, dan 20 ppm. Hasil ini menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berpotensi dikembangkan sebagai platform respons optik sederhana untuk skrining Pb^{2+} pada matriks herbal nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, S., Jangir, L. K., Rathore, K. S., Kumar, M., & Awasthi, K. (2019). Morphology-dependent structural and optical properties of ZnO nanostructures. *Applied Physics A*, 125(8), 553. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2852-x>
- Al Mansoori, D. H. H. (2026). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Boswellia serrata* extract for antibacterial and antibiofilm applications against oral pathogens. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 1–11. <https://doi.org/10.35495/ajab.2025.221>
- Arciniegas-Grijalba, P. A., Patiño-Portela, M. C., Mosquera-Sánchez, L. P., Guerrero-Vargas, J. A., & Rodríguez-Páez, J. E. (2017). ZnO nanoparticles (ZnO-NPs) and their antifungal activity against coffee fungus *Erythricium salmonicolor*. *Applied Nanoscience*, 7(5), 225–241. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0561-3>
- Armaković, S. J., Armaković, S., Bilić, A., & Savanović, M. M. (2025). ZnO-Based Photocatalysts: Synergistic Effects of Material Modifications and Machine Learning Optimization. *Catalysts*, 15(8), 1–48. <https://doi.org/10.3390/catal15080793>
- Ayub, A., Bahruji, H., & Mahadi, A. H. (2021). Ni Nanoparticles on Reducible Metal Oxides (Sm₂O₃, CeO₂, ZnO) as Catalysts for CO₂ Methanation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis; 2021: BCREC Volume 16 Issue 3 Year 2021 (September 2021)DO - 10.9767/Bcrec.16.3.10948.641-650* .
<https://journal.bcrec.id/index.php/bcrec/article/view/10948>
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Cabral, L., Lopez-Richard, V., Da Silva, J. L. F., Marques, G. E., Lima, M. P., Onofre, Y. J., Teodoro, M. D., & de Godoy, M. P. F. (2020). Insights into the nature of optically active defects of ZnO. *Journal of Luminescence*, 227, 117536.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117536>
- Che, R., Tu, B., Zhu, Y., Miao, J., Jin, X., & Chen, S. (n.d.). Waste rice noodle-based CQDs/ZnO composite nanorod array on steel wire mesh: Preparation and photocatalytic capability. *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 105231.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105231>
- Cheng, Y.-F., Zhao, Y.-J., Chen, C., & Zhang, F. (2025). Heavy Metals Toxicity: Mechanism,

- Health Effects, and Therapeutic Interventions. *MedComm*, 6(9), e70241.
<https://doi.org/10.1002/mco2.70241>
- Chowdhury, I. (2022). Removal of lead ions (Pb²⁺) from water and wastewater: a review on the low-cost adsorbents. *Applied Water Science*, 12. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01703-6>
- DeVito, N. J., & Drysdale, H. (2022). Issues with reporting and interpretation of Khan et al. 2021. *BMC Infectious Diseases*, 22(1), 567. <https://doi.org/10.1186/s12879-022-07551-8>
- Fahad, S., Khan, A., Akbar, F., Ullah, R., & Wajidullah. (2021). Green synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles (zno- nps) using leaf extract of Cucumis sativus; Characterization, in vitro properties and environmental applications. *Bioscience Research*, 18, 3182–3192.
- Fan, J. C., Sreekanth, K. M., Xie, Z., Chang, S. L., & Rao, K. V. (2013). p-Type ZnO materials: Theory, growth, properties and devices. *Progress in Materials Science*, 58(6), 874–985.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.002>
- Favre-Godal, Q., Hubert, J., Kotland, A., & ... (2022). Extensive Phytochemical Assessment of *Dendrobium fimbriatum* Hook (Orchidaceae). *Natural Product ...*
<https://doi.org/10.1177/1934578X221074526>
- Filippov, S. K., Khusnutdinov, R., Murmiliuk, A., Inam, W., Zakharova, L. Y., Zhang, H., & Khutoryanskiy, V. V. (2023). Dynamic light scattering and transmission electron microscopy in drug delivery: a roadmap for correct characterization of nanoparticles and interpretation of results. *Materials Horizons*, 10(12), 5354–5370.
<https://doi.org/10.1039/d3mh00717k>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 17, Issue 11, p. 3782). <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Gong, Y., Andelman, T., Neumark, G., O'Brien, S., & Kuskovsky, I. (2007). Origin of defect-related green emission from ZnO nanoparticles: Effect of surface modification. *Nanoscale Research Letters*, 2, 297–302. <https://doi.org/10.1007/s11671-007-9064-6>
- Gusatti, M., Barroso, G. S., De Campos, C. E. M., De Souza, D. A. R., De Almeida Do Rosário, J., Limaa, R. B., Milioli, C. C., Silvaa, L. A., Riella, H. G., & Kuhnen, N. C. (2011). Effect of different precursors in the chemical synthesis of ZnO nanocrystals. *Materials Research*, 14(2), 264–267. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000035>

- Hlihor, R. M., Roşca, M., Hagi-Zaleschi, L., Simion, I. M., Daraban, G. M., & Stoleru, V. (2022). Medicinal Plant Growth in Heavy Metals Contaminated Soils: Responses to Metal Stress and Induced Risks to Human Health. In *Toxics* (Vol. 10, Issue 9, p. 499). <https://doi.org/10.3390/toxics10090499>
- Hou, Q., Buckeridge, J., Walsh, A., Xie, Z., Lu, Y., Keal, T. W., Guan, J., Woodley, S. M., Catlow, C. R. A., & Sokol, A. A. (2021). The Interplay of Interstitial and Substitutional Copper in Zinc Oxide. *Frontiers in Chemistry*, 9, 780935. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.780935>
- iTeh Standard Preview. (2017). *INTERNATIONAL STANDARD ISO 22412:2017*.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B., & Beeregowda, K. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7, 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Janotti, A., & de Walle, C. G. (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 126501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/12/126501>
- Janotti, A., & Walle, C. (2006). New Insights into the Role of Native Point Defects in ZnO. *Journal of Crystal Growth*, 287, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.10.043>
- Jasińska-Balwierz, A., Krypel, P., Świsłowski, P., Rajfur, M., Balwierz, R., & Ochędzan-Siodłak, W. (2025). Heavy Metal Contamination in Adaptogenic Herbal Dietary Supplements: Experimental, Assessment and Regulatory Safety Perspectives. *Biology*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/biology14111479>
- Khashij, M., Salmani Nodoushan, M., Dalvand, A., Fallahzadeh, H., Haghirosadat, F., & Mokhtari, M. (2022). ZnO-based nanocomposites for removal of lead (Pb 2+) from water/wastewater: a review. *Pigment & Resin Technology*, 52. <https://doi.org/10.1108/PRT-01-2022-0003>
- Klingshirn, C. (2007). ZnO: Material, Physics and Applications. *ChemPhysChem*, 8(6), 782–803. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cphc.200700002>
- Kołodziejczak-Radzimska, A., & Jesionowski, T. (2014). Zinc Oxide-From Synthesis to Application: A Review. *Materials (Basel, Switzerland)*, 7(4), 2833–2881. <https://doi.org/10.3390/ma7042833>
- Krasovska, M., Gerbreder, V., Mihailova, I., Ogurcovs, A., Sledvskis, E., Gerbreder, A., & Sarajevs, P. (2018). ZnO-nanostructure-based electrochemical sensor: Effect of

- nanostructure morphology on the sensing of heavy metal ions. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9, 2421–2431. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.227>
- Leprince-Wang, Y., Jing, G., & El Zein, B. (2023). Novel ZnO-Based Nanostructures: Synthesis, Characterization and Applications. In *Crystals* (Vol. 13, Issue 2, p. 338). <https://doi.org/10.3390/cryst13020338>
- Look, D. C. (2001). Recent Advances in ZnO Materials and Devices. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, 80, 383–387. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:98615926>
- Lopes, A. C. B. A., Peixe, T. S., Mesas, A. E., & Paoliello, M. M. B. (2016). Lead Exposure and Oxidative Stress: A Systematic Review. In P. de Voogt (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 236* (pp. 193–238). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20013-2_3
- Luo, L., Wang, B., Jiang, J., Fitzgerald, M., Huang, Q., Yu, Z., Li, H., Zhang, J., Wei, J., Yang, C., Zhang, H., Dong, L., & Chen, S. (2020). Heavy Metal Contaminations in Herbal Medicines: Determination, Comprehensive Risk Assessments, and Solutions. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 595335. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.595335>
- Lv, J., Li, C., & Chai, Z. (2019). Defect luminescence and its mediated physical properties in ZnO. *Journal of Luminescence*, 208, 225–237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.050>
- Meyer, B., & Marx, D. (2003). Density-functional study of the structure and stability of ZnO surfaces. *Phys. Rev. B*, 67(3), 35403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.035403>
- Mishra, R. K., Verma, K., & singh, D. sethi. (2024). Defect engineering in nanomaterials: Impact, challenges, and applications. *Smart Materials in Manufacturing*, 2, 100052. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100052>
- Mozhiarasi, V., Raman, K., Radhakrishnan, L., Paramasivam, R., & Natesan, P. (2022). *Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Growth, Carcass Characteristics and Intestinal Tight Junction Protein Gene Expression in 35-day old Broiler Chickens*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2243628/v1>
- Mudassar, H., Hina, K., Ghani, U., Afzaal, Q., Shah, A. A., Shaffique, S., & Elansary, H. O. (2025). Adsorptive removal of Pb²⁺ from wastewater using ZnO-Biochar nanocomposite. *Scientific Reports*, 15(1), 29517. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13228-4>

- Nadupalli, S., Repp, S., Weber, S., & Erdem, E. (2021). About defect phenomena in ZnO nanocrystals. *Nanoscale*, 13(20), 9160–9171. <https://doi.org/10.1039/d1nr00943e>
- Özgür, Ü., Alivov, Y., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M., Dogan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J., & Morkoç, H. (2005). A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*, 98, 41301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- Pal, S., Sarkar, A., Kumar, P., Kanjilal, D., Rakshit, T., Ray, S. K., & Jana, D. (2016). Low temperature photoluminescence from disordered granular ZnO. *Journal of Luminescence*, 169, 326–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.09.015>
- Pearnton, S. J., Norton, D. P., Ip, K., Heo, Y. W., & Steiner, T. (2005). RETRACTED: Recent progress in processing and properties of ZnO. *Progress in Materials Science*, 50(3), 293–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.04.001>
- Pil, J., Kim, S., Park, J.-Y., Kang, M., Ok, I.-W., & Shim. (2009). Preparation of ZnO Thin Films Using Zn/O-containing Single Precursor through MOCVD Method. *Bull. Korean Chem. Soc*, 30. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2009.30.1.114>
- Preeti, K., & Sharma, S. K. (2026). Hierarchical Plasmonic Au@ZnO Chemosensor Enhanced the Sensitivity and Detection Limit of Pb²⁺ Metallic Ions. *ACS Omega*, 11(4), 4957–4972. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09089>
- Purwaningrum, W., Sari, F. P., Julinar, Ahmadi, A., & Said, M. (2022). Effect of Al Concentration over ZnO-Al₂O₃ Physicochemical Characteristics and Removal of Remazol Red RB. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 22(2), 206–217. <https://doi.org/10.22146/ajche.70084>
- Reynolds, D. C., Look, D. C., Jogai, B., Litton, C. W., Cantwell, G., & Harsch, W. C. (1999). Valence-band ordering in ZnO. *Phys. Rev. B*, 60(4), 2340–2344. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.2340>
- Rojas, P., Ruiz-Sánchez, E., Ríos, C., Ruiz-Chow, Á., & Reséndiz-Albor, A. A. (2021). A Health Risk Assessment of Lead and Other Metals in Pharmaceutical Herbal Products and Dietary Supplements Containing Ginkgo biloba in the Mexico City Metropolitan Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph18168285>
- Samanta, P. K. (2020). Band gap engineering, quantum confinement, defect mediated broadband visible photoluminescence and associated quantum States of size tuned

- zinc oxide nanostructures. *Optik*, 221, 165337.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165337>
- Sasmal, M., & Bhattacharyya, T. K. (2023). Synthesis of BSA-Conjugated ZnO Nanoparticle for Pb²⁺ Sensing Applications. *IETE Journal of Research*, 69(4), 2207–2211.
<https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1886880>
- Shakir, H. A., Alsaffar, M. A., Mageed, A. K., Sukkar, K. A., & Ghany, M. A. A. (2024). Optimizing Photocatalytic Lead Removal from Wastewater Using ZnO/ZrO₂: A Response Surface Methodology Approach. *ChemEngineering*, 8(4).
<https://doi.org/10.3390/chemengineering8040072>
- Simsek, T., Ceylan, A., Aşkın, G., & Özcan, Ş. (2020). Band Gap Engineering of ZnO Nanocrystallites Prepared via Ball-Milling. *Journal of Polytechnic*, 25.
<https://doi.org/10.2339/politeknik.647702>
- Stetefeld, J., McKenna, S. A., & Patel, T. R. (2016). Dynamic light scattering: a practical guide and applications in biomedical sciences. *Biophysical Reviews*, 8(4), 409–427.
<https://doi.org/10.1007/s12551-016-0218-6>
- Strunk, J., Kähler, K., Xia, X., & Muhler, M. (2009). The surface chemistry of ZnO nanoparticles applied as heterogeneous catalysts in methanol synthesis. *Surface Science*, 603(10), 1776–1783.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susc.2008.09.063>
- Thi, L., Pung, S., Sreekantan, S., Matsuda, A., & Huynh, D. P. (2019). Mechanisms of heavy metal ions removal by ZnO particles. *Heliyon*, 5, e01440.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01440>
- Vanheusden, K., Seager, C. H., Warren, W. L., Tallant, D. R., Caruso, J., Hampden-Smith, M. J., & Kodas, T. T. (1997). Green photoluminescence efficiency and free-carrier density in ZnO phosphor powders prepared by spray pyrolysis. *Journal of Luminescence*, 75(1), 11–16. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(96\)00096-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-2313(96)00096-8)
- Vatsha, B., Madumo, T., Ngxangxa, S., Chabalala, M., Ntsendwana, B., & Arderne, C. (2026). Engineering strategies and challenges of Zinc Oxide @Waste-Derived Activated Carbon nanocomposite for the removal of dyes, degradation and toxic metals uptake – A Review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 101193.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2026.101193>
- Venema, P., Hiemstra, T., & WH, van R. (1996). Multisite Adsorption of Cadmium on

Goethite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 183(2), 515–527.

<https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0575>

Wang, S., Gao, M., Ma, B., Xi, M., & Kong, F. (2020). Size-dependent effects of ZnO nanoparticles on performance, microbial enzymatic activity and extracellular polymeric substances in sequencing batch reactor. *Environmental Pollution*, 257, 113596.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113596>

WHO. (2021). Quality control methods for medicinal plant materials. World Health Organization Geneva. *WHO*, 33–35.

Wolf, J. M., Koopmeiners, J. S., & Vock, D. M. (2024). Commentary on Chen et al. (2022): The need for continued methodological research on leveraging information in secondary endpoints for more efficient RCTs. *Contemporary Clinical Trials*, 145, 107664.

<https://doi.org/10.1016/j.cct.2024.107664>

Zheng, L., Liu, M., Zhang, H., Zheng, Z., Wang, Z., Cheng, H., Wang, P., Liu, Y., & Huang, B. (2021). Fabrication of ZnO Ceramics with Defects by Spark Plasma Sintering Method and Investigations of Their Photoelectrochemical Properties. *Nanomaterials*, 11, 2506.

<https://doi.org/10.3390/nano11102506>

Zhou, J., Nomenyo, K., Cesar, C. C., Lusson, A., Schwartzberg, A., Yen, C.-C., Woon, W.-Y., & Lerondel, G. (2020). Giant defect emission enhancement from ZnO nanowires through desulfurization process. *Scientific Reports*, 10(1), 4237.

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61189-7>

Zhu, C., & Wang, X. (2025). Nanomaterial ZnO Synthesis and Its Photocatalytic Applications: A Review. *Nanomaterials*, 15(9), 1–32. <https://doi.org/10.3390/nano15090682>