Buletin SK 10(2)(2026): 117-127
https://doi.org/10.17576/bsk-2026-10(2)-04 ISSN 2250-1852

Artikel Asli / Original Article

Penentuan Keberkesanan Nanopartikel Zink yang Disintesis secara Hijau dalam Penyingkiran Kromium dari Air Sisa Menggunakan Ekstrak Kulit Kerdas (*Archidendron bubalinum*)

Determination of the Effectiveness of Green Synthesised Zinc Nanoparticles using Kerdas (*Archidendron bubalinum*) Peel Extract in the Removal of Chromium and Nickel from Wastewater

FATIMAH AL-ZAHRA' MOHAMAD AKHYAR[1], FARAH DIYANA ARIFFIN[1*], AZHAR ABDUL HALIM[2], AIDA SORAYA SHAMSUDDIN[3]

[1]Environmental Health and Industrial Safety Programme, Faculty of Health Sciences, Universiti Kebangsaan Malaysia, Jalan Raja Muda Abdul Aziz, 50300 Kuala Lumpur, Malaysia

[2]Department of Earth Science & Environment, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

[3]Institute for Environment and Development (LESTARI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

*Corresponding author; email: farahdiyana@ukm.edu.my

Received date: 20 August 2026
Revised date: 4 October 2026
Accepted date: 8 October 2026
Published date: 10 October 2026

ABSTRAK

Peningkatan pencemaran sumber air oleh logam berat, terutamanya kromium heksavalen (Cr(VI)), menimbulkan risiko alam sekitar dan kesihatan awam yang serius disebabkan oleh ketoksikannya yang tinggi. Pada masa yang sama, kulit buah-buahan mempunyai potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan mampan berbanding dibuang sebagai sisa pertanian. Kajian ini bertujuan untuk mensintesis nanopartikel zink oksida (ZnO NP) menggunakan kaedah sintesis hijau dengan ekstrak kulit buah kerdas (*Archidendron bubalinum*) dan menilai keberkesanannya dalam menyingkirkan Cr(VI) daripada larutan akues. Nanopartikel ZnO yang disintesis dianalisis karakternya menggunakan analisis saiz zarah (PSA), pembelauan sinar-X (XRD), dan spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR). Analisis PSA menunjukkan bahawa nanopartikel tersebut mempunyai saiz purata 2.93 nm. Keputusan XRD mengesahkan pembentukan nanopartikel ZnO dengan struktur kristal wurtzit heksagon, manakala analisis FTIR menunjukkan kehadiran kumpulan berfungsi daripada ekstrak tumbuhan yang menyumbang kepada pemstabilan nanopartikel, iaitu getaran regangan kumpulan hidroksil (–OH), ikatan karbon dioksida (O=C=O), getaran regangan ion karbonat (CO_3^{2-}), ikatan peroksida (C–O–C), serta getaran regangan kumpulan tiol atau tioeter (CH_2–S–(C–S)). Kajian jerapan telah dijalankan untuk menilai kesan pH, dos penjerap, dan masa sentuhan terhadap penyingkiran kromium. Kecekapan penyingkiran tertinggi sebanyak 80% telah dicapai pada pH 7, dos penjerap 0.05 g, dan masa sentuhan selama 60 minit. Kelakuan jerapan mematuhi model isoterma Langmuir (R^2 = 0.89) dan model kinetik pseudo-tingkat-kedua (R^2 = 0.99), yang menunjukkan penjerapan kimia dwilapis (monolayer chemisorption). Secara keseluruhannya, keputusan ini membuktikan bahawa nanopartikel ZnO yang disintesis secara hijau daripada kulit kerdas merupakan penjerap mesra alam yang berpotensi untuk rawatan air sisa yang dicemari kromium.

Kata Kunci: Kromium, Kerdas, Nanopartikel ZnO, Penjerapan, Sintesis Hijau

ABSTRACT

The increasing contamination of water resources by heavy metals, particularly hexavalent chromium (Cr (VI)), poses serious environmental and public health risks due to its high toxicity. At the same time, fruit peels have potential to be utilized as sustainable materials instead of being discarded as agricultural waste. This study aimed

Copyright © 2026 Faculty of Health Science UKM. All right reserved

to synthesize zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using a green synthesis method with kerdas fruit peel (Archidendron bubalinum) extract and to evaluate their effectiveness in removing Cr (VI) from aqueous solutions. The synthesized ZnO nanoparticles were characterized using particle size analysis (PSA), X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. PSA showed that the nanoparticles had an average size of 2.93 nm. XRD results confirmed the formation of ZnO nanoparticles with a hexagonal wurtzite crystal structure, while FTIR analysis indicated the presence of functional groups from the plant extract that contributed to nanoparticle stabilization which are the stretching vibrations of hydroxyl groups (–OH), carbon dioxide bonds (O=C=O), carbonate ion stretching vibrations (CO_3^{2-}), peroxide bonds (C–O–C), and stretching vibrations of thiol or thioether groups (CH_2–S–(C–S)). Adsorption studies were conducted to evaluate the effects of pH, adsorbent dosage, and contact time on chromium removal. The highest removal efficiency of 80% was achieved at pH 7, an adsorbent dosage of 0.05 g, and a contact time of 60 minutes. Adsorption behavior followed the Langmuir isotherm model (R^2 = 0.89) and Pseudo-Second-Order kinetic model (R^2 = 0.99), indicating monolayer chemisorption. Overall, the results demonstrate that green-synthesized ZnO nanoparticles from kerdas peel are a promising eco-friendly adsorbent for chromium-contaminated wastewater treatment.

Keywords: Adsorption, Chromium, Green Synthesis, Kerdas, ZnO Nanoparticle

PENGENALAN

Air merupakan sumber asas yang penting untuk kelangsungan kehidupan serta kesihatan manusia. Seiring dengan pertumbuhan aktiviti perindustrian, pertanian dan pembandaran, pencemaran sumber air semakin meningkat, khususnya akibat kehadiran logam berat dalam air sisa. Logam berat seperti arsenik, plumbum, kadmium, merkuri dan kromium sering dilepaskan ke persekitaran melalui industri tekstil, perlombongan, penyaduran elektrik dan pembuatan bateri, seterusnya menjejaskan kualiti air dan kestabilan ekosistem akuatik (Ahmed et al. 2022).

Antara logam berat yang membimbangkan ialah kromium heksavalen, Cr (VI), yang bersifat sangat toksik, karsinogenik dan biokumulatif. Pendedahan berterusan kepada Cr (VI) boleh menyebabkan pelbagai masalah kesihatan seperti kerosakan buah pinggang dan hati, gangguan sistem pembiakan serta peningkatan risiko kanser. Selain itu, Cr (VI) sukar terurai secara biologi dan mudah terkumpul dalam rantai makanan, menjadikannya ancaman jangka panjang kepada kesihatan manusia dan alam sekitar (Zhang et al. 2023). Oleh itu, keperluan terhadap kaedah rawatan air sisa yang berkesan, selamat dan lestari adalah semakin mendesak.

Penggunaan nanopartikel dalam rawatan air sisa telah mendapat perhatian meluas kerana luas permukaannya yang tinggi, kecekapan penjerapan yang baik serta kos operasi yang relatif rendah (Onotu et al. 2025). Nanopartikel zink oksida (ZnO NP) khususnya mempunyai kelebihan dari segi kestabilan kimia dan haba, sifat biokeserasian, ketoksikan yang rendah serta keberkesanan tinggi dalam penyingkiran bahan pencemar organik dan bukan organik. Namun, kaedah sintesis nanopartikel secara konvensional sering dikaitkan dengan penggunaan bahan kimia toksik dan penghasilan sisa berbahaya (Alhalili 2023).

Sehubungan itu, pendekatan sintesis hijau menggunakan ekstrak tumbuhan telah diperkenalkan sebagai alternatif yang lebih mesra alam dan lestari. Kulit buah kerdas (*Archidendron bubalinum*), yang lazimnya dibuang sebagai sisa pertanian, berpotensi dimanfaatkan sebagai agen penurunan dan penstabil dalam sintesis nanopartikel. Walaupun kajian berkaitan sintesis hijau nanopartikel menggunakan ekstrak tumbuhan semakin berkembang, penggunaan kulit buah kerdas sebagai prekursor dalam sintesis nanopartikel zink masih sangat terhad (Serunting et al. 2024). Oleh itu, kajian ini dijalankan untuk meneroka potensi nanopartikel zink oksida yang disintesis secara hijau menggunakan ekstrak kulit buah kerdas sebagai bahan penjerap bagi penyingkiran kromium daripada air sisa.

BAHAN DAN KAEDAH

PENYEDIAAN EKSTRAK KULIT KERDAS

Kulit kerdas dicuci dan kemudiannya dikeringkan di dalam ketuhar. Setelah kering, kulit kerdas dikisar sehingga menjadi zarah-zarah kecil. Seterusnya, sebanyak 5 g kulit kerdas yang telah dikisar dimasukkan ke dalam 100 mL air suling dan campuran ini dipanaskan pada suhu 60°C selama 30 minit untuk menghasilkan ekstrak. Setelah proses pemanasan selesai, larutan dibiarkan sejuk. ditapis bagi mendapatkan ekstrak cecair untuk penghasilan nanopartikel. Ekstrak ini digunakan sebagai agen penurun semula jadi dalam sintesis nanopartikel zink oksida (Riasari et al. 2019).

SINTESIS NANOPARTIKEL ZINK

2.5mL ekstrak kulit kerdas dicampurkan dengan 25mL larutan zink asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)$) (0.5M). seterusnya, 1 M larutan natrium hidroksida (NaOH) ditambahkan secara titisan sehingga pH larutan meningkat kepada 8. Proses ini bertujuan untuk membentuk endapan putih yang menunjukkan permulaan sintesis zink oksida. Campuran kemudiannya dipanaskan pada suhu 70°C selama 30

minit dan digoncangkan secara berterusan sehingga endapan putih terbentuk. Endapan ini dipisahkan dan dicuci menggunakan air suling untuk menghilangkan kekotoran atau ion-ion yang tidak digunakan. Akhir sekali, endapan yang telah dicuci dikeringkan dalam ketuhar pada suhu 450°C selama 2 jam untuk mendapatkan serbuk nanopartikel zink oksida yang stabil (Naiel et al. 2022).

PENCIRIAN SIFAT FIZIKAL NANOPARTIKEL

Nanopartikel zink yang dihasilkan dihantar ke makmal Pusat Pengurusan Penyelidikan & Instrumasi (i-CRIM), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) untuk dianalisis menggunakan tiga teknik pencirian utama iaitu Penganalisis Saiz Zarah (PSA), Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR), dan Pembelauan Sinar-X (XRD). Tujuan analisis ini adalah untuk menentukan saiz nanopartikel yang sepatutnya berada dalan lingkungan 1 hingga 100 nm menggunakan PSA, mengenalpasti kumpulan berfungsi yang hadir dalam ekstrak kulit kerdas menggunakan FTIR dan mengesahkan struktur hablur nanopartikel yang dihasilkan sama ada bahan tersebut bersifat kristalin atau amorfos menggunakan XRD (Millavithanachchi et al. 2025; Pasieczna-Patkowska et al. 2025).

LARUTAN AIR SISA SINTETIK

Larutan akueus garam kalium dikromat, $K_2Cr_2O_7$ disediakan dengan melarutkan 0.12 g bahan tersebut ke dalam 2 L air deionisasi. Nilai pH awal larutan adalah antara pH 5-6. Penentuan kepekatan kromium dilakukan menggunakan kaedah USEPA 1,5-difenilkarbazida (Standard Method 3500 Cr B) (APHA, AWWA & WEF 2017). Namun, pencairan dilakukan sebanyak 100x kerana julat maksima had pengesanan (LOD) spektrofotometer adalah 0.6mg/L.

KAEDAH PENJERAPAN KROMIUM

Kajian penjerapan kromium menggunakan nanopartikel zink oksida (ZnO NP) yang disintesis secara hijau telah dijalankan menggunakan sistem kelompok. Sebanyak 100 mL air sisa sintetik yang mengandungi ion kromium digunakan bagi setiap eksperimen. Kesan pH larutan terhadap kecekapan penjerapan dikaji pada pH 4, 5, 6, 7, dan 8 dengan 0.2 g bahan penjerap dan masa sentuhan dikekalkan malar. Dos optimum bahan penjerap ditentukan dengan memvariasikan jisim nanopartikel ZnO pada 0.05 g, 0.10 g, 0.20 g, 0.03 g, 0.04 g, dan 0.05 g, manakala pH dan masa sentuhan dikekalkan pada pH 7 selama 30 minit. Seterusnya, kesan masa sentuhan terhadap penjerapan kromium dikaji pada selang masa antara 10 minit, 15 minit, 20 minit, 30 minit, 40 minit, 50 minit, dan 60 minit menggunakan dos dan pH optimum. Bagi setiap eksperimen, campuran digoncang secara seragam pada suhu 30°C selama tempoh yang ditetapkan. Selepas proses penjerapan, larutan dianalisis bagi menentukan kecekapan penyingkiran kromium di bawah setiap parameter kajian.

MODEL ISOTERMA PENJERAPAN

Model Langmuir menganggap penjerapan berlaku pada permukaan yang seragam dan setiap tapak mempunyai satu lapisan molekul yang boleh dijerap. Ini bermakna tiada penjerapan lagi yang boleh berlaku pada tapak yang sama (Formula 1) (Azizian & Eris 2022). Model Freundlich pula bermakna penjerapan berlaku pada tapak yang tidak seragam dan penjerapan boleh berlaku lebih daripada satu lapisan (Formula 2) (Jery et al. 2024).

$$1/qe = 1/qm + 1/KL\ qm\ Ce \quad (1)$$

Di mana,

qe = Kuantiti bahan terjerap pada keadaan seimbangan (mg/g)
qm = Kapasiti penjerapan maksimum lapisan tunggal (monolayer) (mg/g)
KL = Pemalar Langmuir yang berkaitan dengan tenaga penjerapan (L/mg)
Ce = Kepekatan bahan terjerap pada keadaan seimbangan (mg/L)

$$Log\ qe = Log\ kf + 1/n\ Log\ Ce \quad (2)$$

Di mana,

qe = Kuantiti bahan terjerap pada keadaan seimbangan (mg/g)
Ce = Kepekatan bahan terjerap pada keadaan seimbangan (mg/L)
Kf = Pemalar Freundlich yang mengukur kapasiti penjerapan $(mg/g(L/mg)^{1/n})$
n = Pemalar heterogeniti yang menunjukkan intensiti atau kebolehjadian penjerapan (tanpa unit)

MODEL KINETIK PENJERAPAN

Model Pseudo-Tertib Pertama dikaitkan dengan penjerapan fizikal, di mana daya interaksi adalah dan kadar penjerapan bergantung kepada bilangan tapak penjerapan yang masih kosong (Formula 3) (Wang et al. 2022).

$$Log\ (qe - qt) = Log\ (qe) - (k1/2.303)\ t \quad (3)$$

Di mana,

qe = Kuantiti bahan terjerap pada keadaan seimbangan (mg/g)
qt = Kuantiti bahan terjerap pada masa t (mg/g)

k1 = Pemalar kadar pseudo-tertib pertama (min^{-1})
t = Masa penjerapan (min)

Manakala, Model Pseudo-Tertib Kedua mencadangkan penjerapan kimia yang berlaku pada permukaan penjerap yang homogen, iaitu semua tapak penjerapan mempunyai tenaga yang hampir sama (Formula 4) (Vareda 2023).

$$t/qt = 1/k_2qe^2 + 1/qe\ (t) \quad (4)$$

Di mana,

qe = Kuantiti bahan terjerap pada keadaan seimbangan (mg/g)
qt = Kuantiti bahan terjerap pada masa t (mg/g)
k_2 = Pemalar kadar pseudo-tertib kedua (g/mg•min)
t = Masa penjerapan (min)

Elovich juga menggambarkan penjerapan kimia, tetapi diaplikasikan kepada permukaan yang tidak homogen, di mana tenaga pengaktifan berbeza bagi setiap tapak penjerapan (Formula 5) (Al-Harby et al. 2021).

$$qt = 1/\beta\ Ln\ (\alpha\beta) + 1/\beta\ Ln\ (t) \quad (5)$$

Di mana,

qt = Kuantiti bahan terjerap pada masa t (mg/g)
α = Kadar penjerapan awal (mg/g•min)
β = Pemalar nyahjerapan/ pemalar liputan permukaan (g/mg)
t = Masa penjerapan (min)

Model Intra-Partikel pula digunakan untuk menilai mekanisme kawalan kadar penjerapan dan bukannya jenis interaksi penjerapan (Formula 6) (Nasser et al. 2024).

$$qt = ki\ (t)^{0.5} + c \quad (6)$$

Di mana,

qt = Kuantiti bahan terjerap pada masa t (mg/g)
ki = Pemalar kadar resapan intra-zarah ($mg/g•min^{-0.5}$)
$t^{0.5}$ = Punca kuasa dua bagi masa ($min^{0.5}$)
C = Pintasan yang mewakili ketebalan lapisan sempadan (*boundary layer thickness*) (mg/g)

PENENTUAN KECEKAPAN PENYINGKIRAN

Peratus kecekapan penyingkiran adalah seperti formula 7 berikut:

$$\text{Kecekapan (\%)} = [(Ci-Cf)/Ci] \times 100 \quad (7)$$

Di mana,

Ci = Kepekatan awal bahan pencemar/ bahan terjerap dalam unit mg/L atau ppm
Cf = Kepekatan akhir dalam unit mg/L atau ppm
% = Peratusan kecekapan penyingkiran

HASIL DAN PERBINCANGAN

PENCIRIAN SAIZ ZARAH NANOPARTIKEL ZINK OKSIDA

Analisis taburan saiz zarah nanopartikel zink oksida (ZnO NP) yang disintesis menggunakan ekstrak kulit kerdas dilakukan menggunakan Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, UK). Taburan saiz mengikut keamatan menunjukkan dua puncak utama, iaitu puncak dalam julat 1–10 nm serta satu puncak lain dalam julat mikrometer (Rajah 1). Walau bagaimanapun, saiz purata nanopartikel yang diperoleh ialah 2.93 nm dengan indeks polidispersiti (PDI) sebanyak 0.487, yang berada dalam julat skala nano dan menunjukkan taburan saiz yang agak seragam (Ilangovan et al. 2021). Kehadiran puncak dalam julat nanometer menunjukkan pembentukan zarah bersaiz nano melalui kaedah sintesis hijau yang digunakan. Saiz zarah yang kecil meningkatkan luas permukaan spesifik, sekali gus menyediakan lebih banyak tapak aktif untuk penjerapan ion kromium (Feisal et al. 2024). Kehadiran zarah bersaiz lebih besar berkemungkinan disebabkan oleh penggumpalan nanopartikel semasa proses sintesis, yang dipengaruhi oleh faktor pH persekitaran. pH memainkan peranan penting dalam mengawal aktiviti biomolekul dalam ekstrak tumbuhan serta interaksi antara ion logam dan agen penurunan, seterusnya mempengaruhi pembentukan dan kestabilan saiz nanopartikel (Lee et al. 2023).

KUMPULAN BERFUNGSI DAN IKATAN KIMIA NANOPARTIKEL ZINK OKSIDA

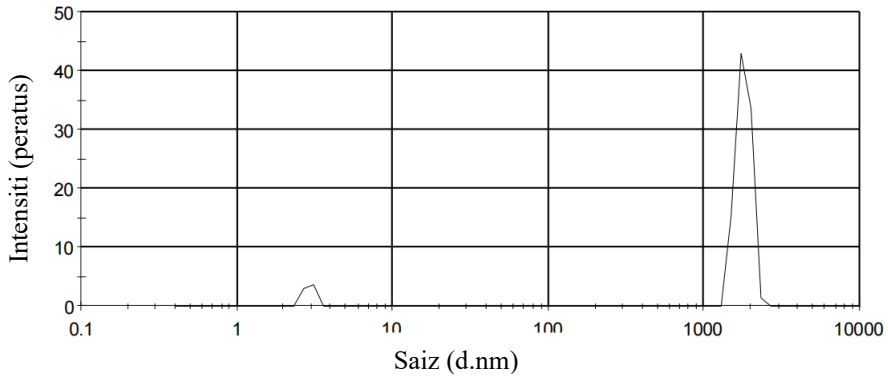
Analisis FTIR yang dijalankan terhadap sampel memberikan maklumat mengenai kumpulan berfungsi dan komposisi kimia yang terdapat dalam sampel (Rajah 2). Nandiyanto at al. (2019) menyatakan, puncak penyerapan yang ketara dan meluas telah dikesan pada nombor gelombang 3270 cm^{-1} yang menandakan kehadiran getaran regangan O-H yang sangat ketara. Puncak ini menunjukkan kehadiran kumpulan berfungsi hidroksil yang lazimnya terdapat dalam sebatian alkohol, fenol, atau asid karboksilik. Penemuan ini memainkan peranan yang sangat penting dalam pencirian komposisi kimia. Puncak pada gelombang 2314 cm^{-1} pula boleh dikaitkan dengan regangan getaran ikatan O=C=O. Nombor gelombang yang diperhatikan ini menunjukkan karbon dioksida atmosfera hadir secara meluas di persekitaran menjadikannya sumber pencemaran latar belakang yang biasa dalam analisis FTIR. Oleh itu, punca CO_2

seperti yang diperhatikan berpunca daripada CO_2 di udara yang terjerap pada permukaan sampel dalam ruang instrumen FTIR (Schott et al. 2021).

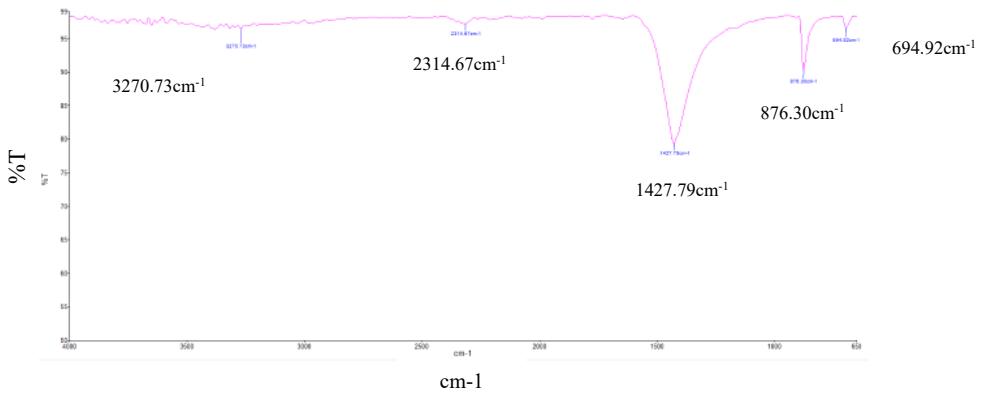
Seterusnya, pemerhatian pada nombor gelombang 1427 cm^{-1} menunjukkan getaran lentur yang dikaitkan dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) yang terbentuk akibat penyerapan CO_2 dalam atmosfera ke dalam larutan beralkali semasa sintesis. Ion ini seterusnya akan bertindak balas dengan zink dan kekal sebagai kumpulan karbonat pada permukaan nanopartikel zink selepas proses pemanasan (Yusuf 2023). Puncak yang diperhatikan pada 876 cm^{-1} dikaitkan pula dengan getaran regangan ikatan peroksida (C-O-O-). Spesies ini terbentuk apabila oksigen atmosfera terjerap pada permukaan ZnO yang mempunyai kecacatan oksigen dan kereaktifan tinggi, terutamanya dalam sistem sintesis hijau yang melibatkan sebatian bioaktif daripada kulit kerdas (Al-Amin et al. 2025). Pada puncak 694 cm^{-1} biasanya dikaitkan dengan getaran regangan tioeter, CH_2–S–(C–S), yang berasal daripada sebatian berunsur sulfur dalam ekstrak kulit kerdas. Menurut Zhao et al. (2021), kumpulan ini kekal terikat pada permukaan nanopartikel selepas sintesis dan berfungsi sebagai tapak pengikatan kuat bagi ion logam berat, sekali gus meningkatkan kestabilan dan keberkesanan proses penjerapan kromium.

STRUKTUR KRISTAL DAN FASA NANOPARTIKEL ZINK OKSIDA

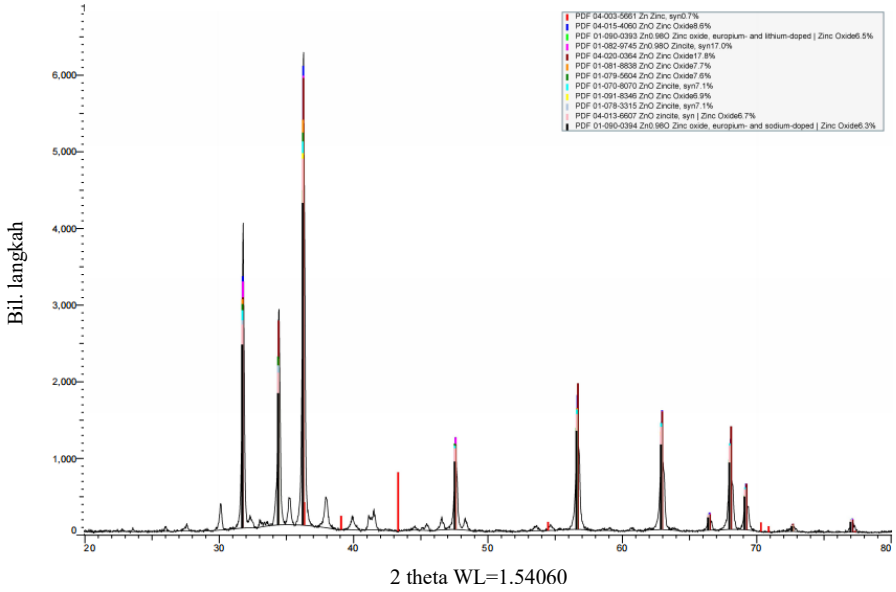
Corak Pembelauan Sinar-X (XRD) nanopartikel zink yang disintesis menunjukkan beberapa puncak tajam pada sudut 2θ, khususnya sekitar 30° – 40°, yang sepadan dengan struktur heksagon wurzite bagi zink oksida (Rajah 3). Menurut Shaban & Alharbi (2022), nanopartikel ZnO juga biasanya hadir pada 2θ = 30° – 40°. Kehadiran puncak yang jelas membuktikan bahawa nanopartikel terhasil mempunyai struktur wurzite yang berkaitan dengan kestabilan dan kereaktifan permukaan nanopartikel. Dapatan ini konsisten dengan Raj et al. (2025) menyatakan bahawa struktur kristal yang teratur menyediakan tapak aktif yang lebih stabil untuk interaksi antara permukaan nanopartikel dan ion kromium di dalam air sisa. ZnO dengan struktur wurzit menunjukkan prestasi penjerapan yang tinggi terhadap logam berat kerana susunan atom yang memudahkan pembentukan ikatan permukaan dengan ion logam (Mathumba et al. 2024). Oleh itu, analisis XRD mengesahkan bahawa nanopartikel zink berjaya terbentuk melalui sintesis hijau menggunakan kulit kerdas



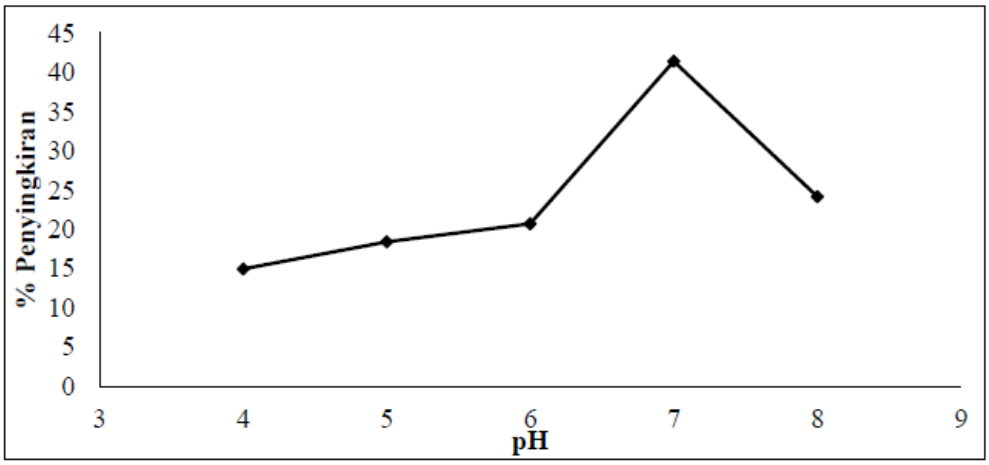
RAJAH 1 Analisis Saiz Partikel (PSA) Nanopartikel Zink Oksida



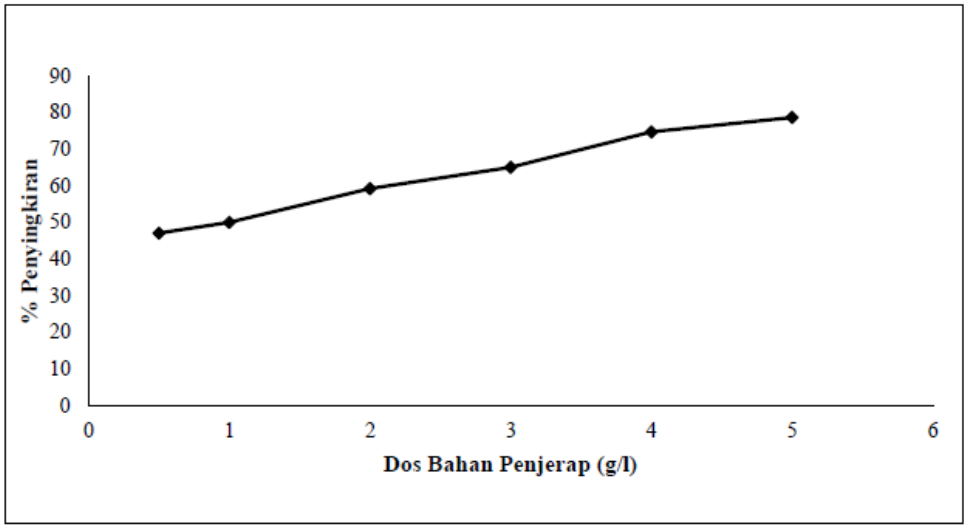
RAJAH 2 Analisis Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) Nanopartikel Zink



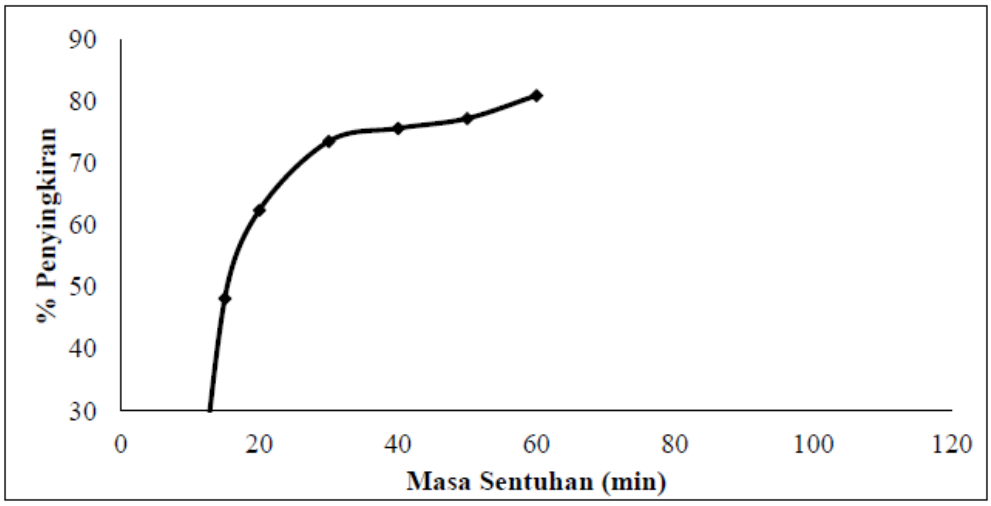
RAJAH 3 Analisis Pembelauan Sinar-X Nanopartikel Zink



RAJAH 4 Peratus kecekapan penyingkiran kromium daripada air sisa sintetik menggunakan nanopartikel zink pada pH yang berbeza



RAJAH 5 Peratus kecekapan penyingkiran kromium daripada air sisa sintetik menggunakan nanopartikel zink



RAJAH 6 Peratus kecekapan penyingkiran kromium daripada air sisa sintetik menggunakan nanopartikel zink pada masa sentuhan yang berbeza

JADUAL 1 Nilai parameter Model Isoterma untuk penjerapan kromium oleh nanopartikel zink

Model Isoterma	**Parameter**	**ZnNP**
Model Langmuir	qm	16.077
	KL	0.106
	R^2	0.894
Model Freundlich	n	2.084
	1/n	0.480
	Kf	-0.645
	R^2	0.815

JADUAL 2 Nilai parameter Model Kinetik untuk penjerapan kromium oleh nanopartikel zink

Model Kinetik	**Parameter**	**ZnNP**
Model Kinetik Pseudo Tertib Pertama	qe	2.656
	K1	0.102
	R^2	0.972
Model Kinetik Pseudo Tertib Kedua	qe	8.741
	qe^2	76.405
	k_2	0.113
	R^2	0.997
Model Elovich	α	0.645
	β	0.682
	R^2	0.927
Model Intra-Partikel	Ki	0.483
	C	3.986
	R^2	0.891

PENENTUAN KECEKAPAN PENYINGKIRAN: VARIASI pH BAHAN PENJERAP

Kecekapan penyingkiran kromium daripada air sisa sintetik menggunakan nanopartikel zink meningkat daripada 15 % pada pH 4 kepada nilai maksimum 41 % pada pH 7, sebelum menurun pada keadaan alkali (Rajah 4). Kecekapan tertinggi pada pH 7 menunjukkan keadaan ini adalah optimum untuk penjerapan kromium. Penurunan kecekapan penjerapan pada pH tinggi dikaitkan dengan dominasi spesies Cr(VI) bercas negatif, terutamanya ion kromat (CrO_4^{2-}), serta peningkatan cas negatif pada permukaan nanopartikel ZnO. Keadaan ini meningkatkan tolakan elektrostatik antara permukaan penjerap dan spesies Cr(VI), sekali gus mengurangkan interaksi penjerapan (Zainuddin et al. 2022; Ravbar et al. 2025). Sensitiviti sifat permukaan ZnO terhadap perubahan pH turut menyokong pemerhatian ini (Malekkiani et al. 2022). Perbezaan nilai pH optimum berbanding kajian terdahulu (Ibikunle et al. 2025)

berkemungkinan berpunca daripada variasi jenis adsorben (Onotu et al. 2025), kaedah sintesis (Onotu et al. 2025), kehadiran bahan bioaktif daripada ekstrak tumbuhan (Baba et al. 2026), serta perbezaan sifat permukaan nanopartikel yang dihasilkan melalui sintesis hijau (Rezania et al. 2024).

PENENTUAN KECEKAPAN PENYINGKIRAN: VARIASI DOS BAHAN PENJERAP

Kecekapan penyingkiran kromium daripada air sisa sintetik meningkat dengan pertambahan dos nanopartikel zink, dengan nilai peratusan maksimum sebanyak 78 % dicapai pada dos 0.5 g (Rajah 5). Peningkatan kecekapan ini dikaitkan dengan pertambahan bilangan tapak aktif pada permukaan adsorben. Namun, kecekapan penjerapan kekal hampir malar apabila dos melebihi 0.5 g, menandakan keadaan keseimbangan telah dicapai. Fenomena ini berkemungkinan disebabkan oleh pertindihan atau penggumpalan zarah adsorben yang mengurangkan kawasan permukaan efektif dan kebolehcapaian tapak aktif (Jyoti et al. 2023). Dapatan ini selari dengan kajian terdahulu yang melaporkan peningkatan kecekapan penjerapan sehingga mencapai dos optimum sebelum berlaku keadaan tepu (Ngamsurach et al. 2022). Oleh itu, dos adsorben sebanyak 0.5 g dikenal pasti sebagai dos optimum bagi penyingkiran kromium dalam kajian ini.

PENENTUAN KECEKAPAN PENYINGKIRAN: VARIASI MASA SENTUHAN

Kecekapan penyingkiran kromium daripada air sisa sintetik menggunakan nanopartikel zink meningkat dengan pertambahan masa sentuhan (Rajah 6), bermula daripada 0.5 % pada 10 minit dan mencapai nilai maksimum sebanyak 81 % pada 60 minit sebelum mencapai keseimbangan selaras dengan kajian (Khedawy et al. 2022). Penjerapan yang cepat pada peringkat awal dikaitkan dengan kehadiran tapak aktif yang banyak pada permukaan adsorben (Jyoti et al. 2023). Selepas mencapai keseimbangan, peningkatan masa sentuhan tidak meningkatkan kecekapan penjerapan dengan ketara, berkemungkinan disebabkan oleh ketepuan tapak aktif serta kemungkinan berlakunya proses nyah-penjerapan ion logam (Pourrahmati-Shiraz et al. 2022). Dapatan ini selari dengan kajian terdahulu yang melaporkan masa sentuhan optimum 60 minit bagi penyingkiran kromium sebelum mencapai keseimbangan penjerapan (Masuku et al. 2024). Oleh itu, masa sentuhan 60 minit dikenal pasti sebagai masa optimum bagi kajian ini.

MODEL ISOTERMA PENJERAPAN

Model isoterma digunakan untuk menerangkan tingkah laku penjerapan ion kromium pada permukaan nanopartikel ZnO. Model Langmuir mengandaikan bahawa penjerapan berlaku secara lapisan tunggal pada tapak aktif yang homogen dan mempunyai tenaga penjerapan yang setara, tanpa interaksi antara molekul yang telah terjerap. Berdasarkan Model Langmuir dalam Jadual 1, nilai kapasiti penjerapan maksimum (Qmax) yang diperoleh ialah 16.08 mg/g, menunjukkan keupayaan nanopartikel zink yang disintesis secara hijau dalam menjerap ion kromium. Nilai pekali korelasi (R^2) bagi model Langmuir (0.89) yang lebih tinggi berbanding Freundlich (0.82) menunjukkan bahawa proses penjerapan lebih sesuai diterangkan oleh model Langmuir dan cenderung berlaku secara lapisan tunggal pada permukaan adsorben yang hampir seragam. Dapatan ini selari dengan kajian oleh Singh et al. (2023), yang melaporkan kesesuaian model Langmuir dengan nilai R^2 melebihi 0.99 bagi penjerapan kromium menggunakan ZnO. Secara keseluruhan, keputusan ini menunjukkan bahawa nanopartikel ZnO yang dihasilkan dari ekstrak kulit buah kerdas berpotensi digunakan secara berkesan dalam rawatan air sisa.

MODEL KINETIK PENJERAPAN

Model kinetik penjerapan seperti dalam Jadual 2 digunakan untuk menilai kadar dan mekanisme penjerapan ion kromium ke atas permukaan nanopartikel zink. Dalam kajian ini, model Pseudo-Tertib Pertama dan Pseudo-Tertib Kedua diaplikasikan terhadap data eksperimen. Kedua-dua model Pseudo-Tertib Pertama dan Pseudo-Tertib Kedua menunjukkan nilai pekali korelasi (R^2) yang tinggi, masing-masing 0.97 dan 0.99, namun kesesuaian yang lebih baik ditunjukkan oleh model Pseudo-Tertib Kedua. Nilai R^2 yang lebih tinggi bagi model ini mencadangkan bahawa proses penjerapan dikawal oleh mekanisme penjerapan kimia yang melibatkan interaksi kuat antara ion kromium dan permukaan nanopartikel zink (Ghani et al. 2022). Model Pseudo-Tertib Kedua mengandaikan kadar penjerapan bergantung kepada bilangan tapak aktif yang tersedia, berbeza dengan model Pseudo-Tertib Pertama yang lazimnya dikaitkan dengan penjerapan fizikal dan interaksi lemah. Dapatan ini selari dengan kajian oleh Merija et al. (2023) dan Baba et al. (2026), yang turut melaporkan bahawa penjerapan kromium menggunakan nanopartikel zink mengikuti model Pseudo-Tertib Kedua ($R^2 = 0.997$) dengan nilai R^2 yang tinggi berbanding model Pseudo-Tertib Pertama ($R^2 = 0.972$).

KEKUATAN & LIMITASI KAJIAN

Kekuatan utama kajian ini adalah pendekatan sintesis hijau yang mampan menggunakan ekstrak kulit kerdas (*Archidendron bubalinum*) di mana ia

adalah sejenis sisa pertanian yang digunakan sebagai agen penurun dan penstabil semula jadi bagi menghasilkan nanopartikel zink oksida (ZnO NP). Kejayaan menghasilkan saiz nanometer (purata 2.93 nm) ini menyediakan luas permukaan spesifik serta kepelbagaian kumpulan fungsi (seperti hidroksil dan tioeter) yang tinggi, sekali gus menyumbang kepada kecekapan penyingkiran kromium (Cr(VI)) sehingga 80–81%. Selain itu, pemodelan data penjerapan yang komprehensif membuktikan bahawa proses penjerapan mematuhi model isoterma Langmuir ($R^2 = 0.894$) dan kinetik pseudo-tertib-kedua ($R^2 = 0.997$), yang mengesahkan mekanisme penjerapan kimia monolapis secara saintifik dan tersusun.

Walau bagaimanapun, limitasi kajian ini termasuklah penggunaan air sisa sintetik dalam sistem kelompok yang tidak menggambarkan kompleksiti matriks air sisa industri sebenar yang mengandungi kation dan anion bersaing. Di samping itu, tahap polidispersiti zarah yang agak tinggi (PDI = 0.487) serta kehadiran puncak mikro dalam analisis PSA menunjukkan kecenderungan penggumpalan zarah, manakala kebolehulangan (reusability) dan potensi pemulihan semula (regeneration/desorption) nano-penjerap ini belum dinilai. Bagi penambahbaikan dan hala tuju penyelidikan masa hadapan, kajian lanjutan wajar menilai prestasi penjerapan nanopartikel ZnO ini ke atas sampel air sisa industri sebenar (seperti sisa penyaduran elektrik atau tekstil) bagi menguji ketahanan dan kepilihan (*selectivity*) penjerap terhadap Cr(VI) di hadapan ion pengganggu.

KESIMPULAN

Kajian ini dijalankan untuk menilai keberkesanan nanopartikel zink yang disintesis secara hijau menggunakan ekstrak kulit buah kerdas (*Archidendron bubalinum*) dalam penyingkiran ion logam berat kromium daripada air sisa sintetik. Keputusan kajian menunjukkan bahawa nanopartikel zink yang dihasilkan mempunyai potensi yang baik sebagai bahan penjerap mesra alam. Secara keseluruhannya, kajian ini membuktikan bahawa penggunaan kulit buah kerdas sebagai bahan semula jadi dalam sintesis hijau nanopartikel zink merupakan satu pendekatan yang berpotensi, lestari dan mesra alam untuk rawatan air sisa yang mengandungi kromium. Hasil kajian ini diharapkan dapat menyumbang kepada pembangunan bahan penjerap alternatif berasaskan sumber semula jadi bagi aplikasi rawatan air pada masa hadapan.

PENGHARGAAN

Kami merakamkan penghargaan atas sokongan pembiayaan daripada Geran Galakan Penyelidik Muda (GGPM-2024-072) Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM).

RUJUKAN

Ahmed, M. F., Mokhtar, M., Lom, C. K. & Majid, N. A. 2022. Identification of water pollution sources for better Langat river basin management in malaysia. *Water* 14(2): 1904. https://doi.org/10.3390/w14121904

Ahmed, S. F., Mofijur, M., Rafa, N., Chowdhury, A. T., Chowdhury, S., Nahrin, M., Islam, A. B. M. S. & Ong, H. C. 2022. Green approaches in synthesizing nanomaterials for environmental nanobioremedation: technological advancements, applications, benefits, and challenges. *Environmental Research* 204: 111967. 10.1016/j.envres.2021.111967

Al-Amin, K., Kawsar, M., Mamun, M. T. R. B. & Hossain, M. S. 2025. Fourier transform infrared spectroscopy technique for analysis of inorganic materials: a review. *Nanoscale* 7(21): 6677-6702. 10.1039/d5na00522a

Alhalili, Z. 2023. Metal oxides nanoparticles: general structural description, chemical, physical, and biological synthesis methods, role in pesticides and heavy metal removal through wastewater treatment. *Molecules* 28(7): 3086. https://doi.org/10.3390/polym13244446.

Al-Harby, N. F., Albahly, E. F. & Mohamed, N. A. 2021. Kinetics isotherm and thermodynamics studies for efficient adsorption of Congo red dye from aqueous solution into Novel Cyanoguanidine-Modified Chitosan adsorbent. *Polymers* 13(24): 4446. https://doi.org/10.3390/polym13244446

APHA, AWWA, & WEF. 2017. Section 3500-Cr B. Colorimetric Method. In E. W. Rice, R. B. Baird, & A. D. Eaton (pnyt.). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Ed ke-23. Washington, DC: American Public Health Association.

Azizian, S. & Eris, S. 2022. Adsorption isotherms and kinetics. *Interface Science and Technology* 33(6): 445-506.10.1016/B978-0-12-818805-7.00011-4

Baba, I. A., Amawuosa, E. C., Mustapha, S., Abdulkareem, A. S. & Tijani, J. O. 2026. Adsorption kinetics, isotherm, and thermodynamics studies of phytochemical-assisted synthesized ZnO nanoparticles for the removal of selected heavy metals from abattoir wastewater. *Desalination and Water Treatment* 325: 101628. 10.1016/j.dwt.2025.101628

Baba, I. A., Awe, O. B., Mustapha, S., Abubakar, M. A., Abdulkareem, A. S., Tijani, J. O., & Obayomi, K. S. 2026. Influence of plant-

derived extracts on the synthesis, physicochemical properties, and applications of metal and metal oxide nanoparticles. *Hybrid Advances* 13: 100666. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2026.100666

Feisal, N. A. S., Kamaludin, N. H., Ahmad & M. A., Ibrahim, T. N. B. T. 2024. A comprehensive review of nanomaterials for efficient heavy metal ions removal in water treatment. *Journal of Water Process Engineering* 64: 105566. 10.1016/j.jwpe.2024.105566

Ghani, U., Hina, K., Iqbal, M., Irshad, M. K., Aslam, I., Saeed, R & Ibrahim, M. 2022. Kinetic and isotherms modeling of methyl orange and chromium (VI) onto hexagonal ZnO microstructures as a membrane for environmental remediation of wastewater. *Chemospere* 309: 136681. 10.1016/j.chemosphere.2022.136681

Ibikunle, P. D., Elemile, O. O., Ejigboye, P. O., Bala, D. O., Olawolu, A. P., Adebayo, A. A. & Olajide, O. S. 2025. Removal of hexavalent chromium from contaminated synthetic groundwater via functionalized carbon nanomaterials modified with zinc and potassium. *Scientific Reports* 15: 33823. https://doi.org/10.1038/s41598-025-01025-y

Ilangovan, R., Subha, V., Ravindran, R. S. V., Kirubanandan, S. & Renganathan. 2021. Nanomaterials: Synthesis, physicochemical characterization, and biopharmaceutical applications. *Nanoscales Processing* 2: 33-70. 10.1016/B978-0-12-820569-3.00002-5

Jyoti, Singh, S., Das, S. & Srivastava, S. 2023. Comparative study for removal of toxic hexavalent chromium by zinc oxide nanoparticles, chitosan, chitin and zinc-chitosan nano-biocomposite. *Environmental Technology & Innovation* 32: 103310. 10.1016/j.eti.2023.103310

Khedawy, M., Moneer, A. A., Ramadan, M. S., Shaker, A. M. & Fadl, E. A. 2024. Performance Enhancement of Green synthesized ZnO Nanocomposite Ultrafiltration Membrane for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 50(4): 447-457. 10.1016/j.ejar.2024.10.004

Malekkiani, M., Magham, A. H. J., Ravari, F. & Dadmehr, M. 2022. Facile fabrication of ternary MWCNTs/ZnO/Chitosan nanocomposite for enhanced photocatalytic degradation of methylene blue and antibacterial activity. *Scientific Reports* 12: 5927. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09571-5

Masuku, M., Nure, J. F., Atagana, H. I., Hlongwa, N. & Nkambule, T. T. I. 2024. Advancing the development of nanocomposite adsorbent through zinc-doped nickel ferrite-pinecone biochar for removal of chromium (VI) from wastewater. *Science of The Total Environment* 908: 168136. 10.1016/j.scitotenv.2023.168136

Mathumba, P., Bilibana, M. P., Olatunde, O. O. & Onwudiwe, D. C. 2024. X-ray diffraction profile analysis of green synthesized ZnO and TiO2 nanoparticles. *Materials Research Express* 11(7): 5011-5021.10.1088/2053-1591/ad63f

Merija, K. S., Rahulan, K. M., Sujatha, R. A. & Angeline, N. 2023. Adsorption of hexavalent chromium from water using graphene oxide/zinc molybdate nanocomposite: Study of kinetics and adsorption isotherms. *Frontiers in Energy Research* 11: 1139604. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1139604

Millavithanachchi, S. S., Gunasena, M. D. K. M., Galpaya, G. D. C. P., Priyadarshana, H. V. V., Indupama, S. V. A. A., Induranga, D. K. A., Kariyawasam, W. A. C. N., Kaluthanthri, D. V. S., & Koswattage, K. R. 2025. Green Synthesis, Optimization, and Characterization of CuO Nanoparticles Using *Tithonia diversifolia* Leaf Extract. *Nanomaterials* 15(15): 1203. https://doi.org/10.3390/nano15151203

Naiel, B., Fawzy, M., Halmy, M.W.A. & Mahmood, A. E. D. 2022. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using sea lavender (*Limonium pruinosum L. Chaz*.) extract: characterization, evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. *Scientific Reports* 12: 20370. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24805-2

Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., Ragadhita, R. 2019. How to read and interpret FTIR spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science & Technology* 4(1): 97-118. 10.17509/ijost.v4i1.15806

Nasser, S. M., Abbas, M. & Trari, M. 2024. Understanding the rate-limiting step adsorption kinetics onto biomaterials for mechanism adsorption control. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism* 49: 1-26. 10.1177/14686783241226858

Ngamsurach, P., Namwongsa, N. & Praipipat, P. 2022. Synthesis of powdered and beaded chitosan materials modified with ZnO for removing lead (II) ions. *Scientific Reports* 12: 17184.https://doi.org/10.1038/s41598-022-22182-4

Onotu, O. P., Samuel, H. S., Undie, D. A., Akinpelu, O. O., Ibekwe, F. A., & Etim, E. E. 2025. Nanoparticles for targeted removal of emerging contaminants in wastewater: mechanisms and sustainable practices. *Discover nano* 20(1): 191. https://doi.org/10.1186/s11671-025-04341-4

Pasieczna-Patkowska, S. Cichy, M. & Fliegher, J. 2025. Application of fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in characterization on green synthesized nanoparticles. *Molecules* 30(3): 648. https://doi.org/10.3390/molecules30030684

Pourrahmati-Shiraz, M., Mohagheghian, A. & Shirzad-Siboni, M. 2022. Synthesis of ZnO immobilized on recycled polyethylene terephtalate for sonocatalytic removal of Cr(VI) from synthetic, drinking waters and electroplating wastewater. *Journal of Environmental Management* 324: 116395. 10.1016/j.jenvman.2022.116395

Raj, L. F. A. A., Pavitra, R. & Namasivayam, S. K. R. 2025. Green route of highly stable zinc oxide nanoparticles using root extract of *Andrographis paniculata* and evaluation their potential activities. *Plant Nano Biology* 12: 100162. 10.1016/j.plana.2025.100162

Ravbar, M. Maver, K., Knaflič, T., Arčon, I., Tušar, N. N., Štangar, U. L. & Šuligoj, A. 2025. Nickel-decorated ZnO nanoparticles for effective solar reduction of hexavalent chromium and removal of selected pharmaceuticals. *Applied Surface Science* 681: 161463. 10.1016/j.apsusc.2024.161463

Rezania, S., Darajeh, N., Rupani, P. F., Mojiri, A., Kamyab, H., & Taghavijeloudar, M. 2024. Recent Advances in the Adsorption of Different Pollutants from Wastewater Using Carbon-Based and Metal-Oxide Nanoparticles. *Applied Sciences* 14(24): 11492. https://doi.org/10.3390/app142411492

Riasari, H., Fitriansyah, S. N., Hartati, R., Anggadiredja, K. & Sukrasno, S. S. 2019. Comparison of Extraction Methods, Antioxidant Activities, Total Phenol in Seeds and Seed Shells of Kabau (*Archidendron bubalinum (Jack) I.C. Nielsen*) From Lampung and South Sumatra. *Pharmacognosy Journal* 11(6):1278-1284. 10.5530/pj.2019.11.198

Schott, J. A., Do-Thanh, C., Shan, W., Puskar, N. G., Dai, S. & Mahurin, S. M. 2021. FTIR investigation of the interfacial properties and mechanisms of CO_2 sorption in porous ionic liquids. *Green Chemical Engineering* 2(4): 392-401. 10.1016/j.gce.2021.09.003

Shaban, Y. & Alharbi, N. A. 2022. Sunlight-mediated photocatalytic removal of phenanthrene from wastewater using carbon-doped zinc zinc oxide (C-ZnO) nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research* 29: 47841-47831. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19214-x

Singh, S., Naik, T. S. S. K., Thamaraiselvan, C., Behera, S. K., Pavithra, N., Nath, B., Dwivedi, P., Singh, J. & Ramamurthy, P. C. 2023. Applicability of new sustainable and efficient green metal-based nanoparticles for removal of Cr(VI): Adsorption anti-microbial, and DFT studies. *Environmental Pollution* 320: 121105. 10.1016/j.envpol.2023.121105

Singh, V., Nindhi, S., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A. K., Singh, M. P., Sahoo, A., Shekhar, S., Vamanu, E. & Mishra, V. 2023. Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Toxic* 11(2): 147. https://doi.org/10.3390/toxics11020147

Vareda Joao P. 2023. On validity, physical meaning, mechanisms insight and regression of adsorption kinetic model. *Journal of Molecular Liquids* 376: 121416. 10.1016/j.molliq.2023.121416

Wang, Y., Li, Q., Zhou, J., Yun, X. & Wang, J. 2022. A review on the ecotoxicological effects of heavy metals on aquatic organisms. *Journal of Earth Science and Environmental Studies* 6(2): 148-161. 10.25177/JESES.6.2.RA.10797

Yusuf, M. O. 2023. Bond characterization in cementitious materials binders using Fourier-transform infrared spectroscopy. *Applied Science* 13(5): 3353. https://doi.org/10.3390/app13053353

Zainuddin, N. A. M., Sarwani, N. M., Puasa, S. M. & Ismail, K. M. 2022. Reduction of hexavalent chromium to trivalent chromium using sludge from acetylene gas production. *International Journal of Integrated Engineering* 14(5): 178-187. 10.30880/ijie.2022.14.05.020

Zhang, P., Yang, M., Lan, J., Huang, Y., Zhang, J., Huang, S., Yang, Y. & Ru, J. 2023. Water quality degradation due to heavy metal contamination: health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. *Toxics* 11(10): 828. https://doi.org/10.3390/toxics11100828

Zhao, W., Huang, Y., Chen, R., Peng, H., Liao, Y. & Wang, Q. 2021. Facile preparation of thioether/hydroxyl functionalized polyhedral oligomeric silsesquioxanes hybrid polymer for ultrahigh selective adsorption of silver (I) ions. *Reactive and Functional Polymers* 163: 104899. 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104899