

# Sintesis dan Karakterisasi *Zinc Layered Hydroxide Salts* (Zn-LHS) sebagai Adsorben *Methyl Orange* pada Tingkat Keasaman yang Berbeda

Adya Rizky Pradipta<sup>1\*</sup>, Regita Andriani Wiana Putri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Nanoteknologi Pangan, Politeknik AKA Bogor, Jl. Pangeran Sogiri No. 283, Tanah Baru, Kota Bogor, Jawa Barat, 16154, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Kimia Militer, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan, Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat, 16810, Indonesia

\*E-mail: [adya.rizky.p@gmail.com](mailto:adya.rizky.p@gmail.com)

(Received : 20 Februari 2024; Accepted: 1 Agustus 2024; Published: 31 Desember 2024)

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakterisasi dan kinerja adsorpsi *Zinc Layered Hydroxide Salts* (Zn-LHS) terhadap *Methyl Orange* (MO) dalam lingkungan dengan berbagai tingkat keasaman. Zn-LHS disintesis melalui metode kopresipitasi dan dianalisis menggunakan XRD untuk menentukan kristalinitas serta FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada sedangkan SEM-EDX digunakan untuk analisis permukaan Zn-LHS. Zn-LHS yang dihasilkan diuji sebagai adsorben MO dengan menilai stabilitasnya dalam medium asam dan basa serta pengaruh keasaman medium terhadap kemampuan adsorpsi MO. Zn-LHS dengan rasio mol -OH/Zn 0,6 dipilih sebagai adsorben utama dalam studi adsorpsi ini berdasarkan pertimbangan kristalinitas yang lebih tinggi dan kemurnian material. Analisis FTIR menunjukkan adanya puncak vibrasi -OH, H-O-H, dan ion nitrat pada spektra Zn-LHS hasil sintesis. Pengukuran SEM menunjukkan bahwa Zn-LHS memiliki bentuk lempengan bulat pipih dengan rata-rata diameter partikel  $2 \pm 0,3 \mu\text{m}$ . Penelitian ini juga mengevaluasi parameter lain seperti kapasitas adsorpsi dan stabilitas material dalam berbagai kondisi pH. Stabilitas Zn-LHS diuji dalam rentang pH 1 hingga 12, di mana material menunjukkan stabilitas yang lebih baik pada pH di atas 2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH 3 merupakan kondisi optimum untuk adsorpsi MO oleh Zn-LHS dengan kapasitas adsorpsi mencapai  $1,213 \times 10^{-5} \text{ mol g}^{-1}$ . Studi ini menekankan pentingnya pemilihan rasio mol -OH/Zn yang tepat dan kondisi lingkungan yang optimal untuk memaksimalkan efisiensi adsorpsi Zn-LHS sebagai adsorben MO. Temuan ini berpotensi untuk diterapkan dalam pengolahan limbah industri yang mengandung zat warna anionik.

**Kata kunci :** *Zinc Layered Hydroxide Salts* (Zn-LHS); metil jingga; adsorpsi; karakterisasi; tingkat keasaman

## Abstract

*This study aims to evaluate the characterization and adsorption performance of Zinc Layered Hydroxide Salts (Zn-LHS) towards Methyl Orange (MO) in environments with varying acidity levels. Zn-LHS was synthesized through the coprecipitation method and analyzed using XRD to determine crystallinity, FTIR to identify functional groups, and SEM-EDX for surface analysis of Zn-LHS. The produced Zn-LHS was tested as an adsorbent for MO by assessing its stability in acidic and basic media and the influence of medium acidity on MO adsorption capacity. Zn-LHS with an -OH/Zn molar ratio of 0.6 was chosen as the primary adsorbent in this adsorption study based on higher crystallinity and material purity. FTIR analysis showed a shift in -OH, H-O-H, and nitric ion vibration peaks in the synthesized Zn-LHS spectrum. SEM measurements indicated that Zn-LHS had a round flat plate shape with an average particle diameter of approximately  $2 \pm 0.3 \mu\text{m}$ . This study also evaluated other parameters such as adsorption capacity and material stability in various pH conditions. The stability of Zn-LHS was tested in the pH range of 1 to 12, where the material demonstrated better stability at pH levels above 2. The results showed that pH 3 is the optimum condition for MO adsorption by Zn-LHS, with an adsorption capacity of  $1.213 \times 10^{-5} \text{ mol g}^{-1}$ . This study highlights the importance of selecting the appropriate -OH/Zn molar ratio and optimal environmental conditions to maximize the efficiency of Zn-LHS as an MO adsorbent. These findings have potential applications in the treatment of industrial wastewater containing anionic dyes.*

**Keywords:** *Zinc Layered Hydroxide Salts* (Zn-LHS); methyl orange; adsorption; characterization; acidity levels

## PENDAHULUAN

Meningkatnya pencemaran lingkungan akibat zat warna telah menjadi perhatian utama bagi masyarakat dan peneliti. Hal ini dipicu oleh banyaknya limbah zat warna yang dihasilkan dari berbagai sektor industri, seperti industri tekstil, percetakan, kertas, makanan, dan plastik. Penelitian Gufran & Mawardi (2019) telah menekankan bahwa warna merupakan indikator pencemaran yang jelas terlihat pada limbah cair, di mana bahkan jumlah zat warna yang sangat kecil (kurang dari 1 ppm untuk beberapa jenis) dapat terdeteksi dan sebagian besar memiliki sifat karsinogenik. Penelitian Silveira et al. (2009) telah memperkirakan bahwa lebih dari 100.000 jenis zat warna tersedia secara komersial dan lebih dari 7x10 ton zat warna dihasilkan setiap tahun, dengan dua persennya langsung dibuang melalui limbah cair. Pembatasan penggunaan zat warna dalam limbah cair dilakukan untuk mengurangi dampaknya terhadap lingkungan.

Sebagian besar zat warna yang digunakan dalam industri berasal dari jenis zat warna azo karena ketersediaannya dan variasi warna yang lebih beragam dibandingkan dengan pewarna alami (Barciela et al., 2023). Salah satu contoh zat warna azo adalah Metil jingga (MO), yang banyak digunakan dalam berbagai industri seperti tekstil, percetakan, kertas, makanan, farmasi, dan laboratorium penelitian (Farhan Hanafi & Sapawe, 2020). MO memiliki struktur aromatik kompleks yang sulit terdegradasi karena stabil terhadap cahaya dan tidak mudah teroksidasi. Kehadiran MO dalam lingkungan perairan dapat mengganggu ekosistem biota karena dapat mengurangi masuknya oksigen yang diperlukan untuk fotosintesis, serta berpotensi bersifat toksik dan karsinogenik setelah mengalami proses metabolisme di dalam tubuh manusia (Emmanuel et al., 2023; Tkaczyk et al., 2020). Oleh karena itu, pengembangan metode penghilangan zat warna dari limbah industri harus dilakukan secara berkelanjutan. Beberapa metode yang telah dikembangkan meliputi pengolahan secara biologis, adsorpsi, oksidasi kimia, fotolisis, dan elektrofotokatalisis. Di antara metode-metode tersebut, adsorpsi dianggap sebagai salah satu metode yang efisien karena memiliki kinerja tinggi, biaya ekonomis, desain atau operasi yang sederhana, dan tidak menghasilkan limbah berbahaya (L. Wang et al., 2020).

MO termasuk dalam jenis zat warna anionik, sehingga diperlukan adsorben yang selektif terhadap anion untuk menghilangkannya. Umumnya, adsorben yang efektif untuk menjerap anion berasal dari kelompok lempung anionik. Meskipun lempung anionik jarang ditemui di alam, namun mudah untuk disintesis (Zhang et al., 2021). Beberapa penelitian telah dilakukan menggunakan lempung anionik sebagai adsorben zat warna, seperti adsorpsi Indigo Carmine oleh Mg-Al-CO<sub>3</sub> LDH (de Souza dos Santos et al., 2021), adsorpsi MO oleh Mg-Al

Hidrotalsit (Mittal, 2021), dan adsorpsi Congo Red oleh Mg-Fe-CO<sub>3</sub> LDH (Senthil Kumar et al., 2019). Layered Hydroxide Salts (LHS) merupakan jenis lempung anionik yang memiliki struktur berlapis dengan muatan positif pada lapisan dan diseimbangkan oleh anion di daerah antar lapisannya. Kemampuan LHS sebagai penukar anion menjadikannya sebagai kandidat yang menarik sebagai adsorben zat warna anionik. Metode sintesis yang umum digunakan untuk LHS adalah metode hidrotermal, yang membutuhkan waktu relatif lama dan tidak lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan metode kopresipitasi (Oosthuizen et al., 2023).

Beberapa penelitian telah menggunakan LHS sebagai adsorben zat warna, seperti penelitian Jaeger et al., (2021) yang menggunakan Ni-Zn LHS sebagai adsorben *navy blue* dan *yellow F3G*, serta penelitian Morais de Faria et al., (2021) yang mensintesis Zn-LHS sebagai adsorben ion kalsium. Namun, penelitian mengenai adsorpsi MO oleh Zn-LHS masih terbatas.

Penelitian yang dilakukan oleh Da Silva et al., (2012) membahas interkalasi garam hidroksida seng (Zn-LHS) dengan zat warna azo anionik, yaitu *methyl orange* (MO). Penelitian tersebut memiliki beberapa keterbatasan, seperti kondisi uji yang tidak mengeksplorasi variabel lingkungan lainnya yang dapat mempengaruhi kinerja adsorpsi dan stabilitas material. Selain itu, metode sintesis yang digunakan mungkin kurang ramah lingkungan karena memerlukan penggunaan pelarut dalam jumlah besar dan energi tinggi untuk pengeringan vakum. Metode karakterisasi yang digunakan, yaitu XRD dan FTIR, mungkin tidak cukup untuk memahami interaksi kompleks antara lapisan Zn-LHS dan zat warna pada tingkat molekuler. Terakhir, tidak ada optimasi rasio mol -OH/Zn yang dilakukan secara mendetail.

Dalam penelitian ini, dilakukan sintesis Zn-LHS menggunakan metode kopresipitasi. Penggunaan metode kopresipitasi diharapkan dapat menghasilkan adsorben yang lebih ramah lingkungan. Metode ini dilakukan pada suhu ruang, menggunakan air sebagai pelarut, dan mengurangi kebutuhan pencucian dan pengeringan berenergi tinggi. Kemampuan Zn-LHS sebagai adsorben akan dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam menghilangkan zat warna MO, yang merupakan model polutan organik yang bersifat toksik dan karsinogenik. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi kinerja adsorpsi Zn-LHS terhadap MO dalam berbagai tingkat keasaman, tetapi juga menguji stabilitas material dalam rentang pH yang luas (1 hingga 12). Selain itu, penelitian ini menggunakan metode karakterisasi tambahan seperti SEM-EDX untuk analisis permukaan Zn-LHS dan melakukan optimasi rasio mol -OH/Zn untuk memahami pengaruh komposisi sintesis terhadap sifat kristalinitas dan kemurnian Zn-LHS. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi

signifikan dalam memperluas pemahaman kita tentang penggunaan Zn-LHS sebagai adsorben dalam pengolahan limbah industri yang mengandung zat warna anionik. Kemampuan Zn-LHS sebagai adsorben akan dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam menghilangkan zat warna MO, yang merupakan model polutan organik yang bersifat toksik dan karsinogenik (Aljuaid et al., 2023).

## BAHAN DAN METODE

### Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas Laboratorium, neraca analitik (Mettler Toledo AL204), lumpang dan mortal agat, papan pengaduk dan pemanas merk Cimarex, magnet pengaduk, pH meter (Horiba seri F-52), oven (Fischer Scientific model 655F), shaker (VRN 200). Instrumen analisis yang digunakan dalam penelitian ini meliputi difraktogram sinar-X (Shimadzu XRD-6000), spektrofotometer inframerah (Shimadzu FTIR Prestige21), *Scanning Electron Microscope-EDX* (JEOL tipe JED-2300) Spektrofotometer UV-Vis (Optima SP-300), dan spektrofotometri serapan atom (Perkim Elmer 3110).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama yang meliputi  $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  (Merck, Jerman), NaOH (Merck, Jerman), zat warna MO (Merck, Jerman), HCl 37% (Merck, Jerman), Akuades (CV ARD Pratama, Indonesia), larutan buffer pH 4 dan pH 7 (CV ARD Pratama, Indonesia), dan kertas Whatman 42.

### Metode

#### Sintesis Zn-LHS

Sintesis Zn-LHS mengikuti Yang et al., (2023) dengan modifikasi. Sintesis Zn-LHS dilakukan dengan menambahkan secara perlahan larutan NaOH 0,75 M ke dalam 10 mL larutan  $Zn(NO_3)_2$  3,5 M. Hal ini dilakukan untuk mencapai rasio mol -OH/Zn dengan variasi rasio mol -OH/Zn sebesar 0,3; 0,6; dan 0,9. Penambahan larutan NaOH dilakukan pada suhu ruang dengan pengadukan selama satu jam. Endapan putih yang dihasilkan kemudian dicuci menggunakan air suling dan dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam. Produk sintesis kemudian dikeringkan kembali menggunakan oven. Selanjutnya, produk sintesis dikarakterisasi menggunakan XRD dan FTIR.

#### Karakterisasi Zn-LHS dengan XRD

Difraksi sinar-X (XRD) digunakan untuk menentukan struktur kristal dan tingkat kristalinitas Zn-LHS. Pengukuran dilakukan menggunakan difraktometer XRD (Shimadzu XRD-6000) dengan radiasi  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) pada 30 mA dan 40 kV. Pola difraksi direkam dengan kecepatan Perhitungan persentase stabilitas Zn-LHS dilakukan dengan rumus berikut:

pemindaian  $2^\circ$  per menit dan interval  $0,02^\circ$ . Data yang diperoleh dibandingkan dengan data referensi dari *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) untuk mengidentifikasi fase dan menentukan parameter kisi.

#### Karakterisasi Zn-LHS dengan FTIR

Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada dalam Zn-LHS. Pengukuran dilakukan menggunakan spektrofotometer FTIR (Shimadzu FTIR Prestige-21) dengan metode transmisi KBr. Spektra direkam dalam rentang bilangan gelombang  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  dengan akumulasi 32 scan dan resolusi nominal  $4 \text{ cm}^{-1}$ . Pergeseran puncak vibrasi dianalisis untuk mengidentifikasi interaksi antara gugus fungsional dan zat warna yang teradsorpsi.

#### Karakterisasi Zn-LHS dengan SEM-EDX

*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX) digunakan untuk melakukan analisis morfologi permukaan dan distribusi elemen pada Zn-LHS. Pengamatan morfologi permukaan dilakukan menggunakan SEM (JEOL tipe JED-2300) dengan mode pembesaran tinggi untuk mendapatkan gambar detail dari struktur permukaan Zn-LHS. Sampel disiapkan dengan cara dilapisi emas menggunakan *sputter coater* untuk meningkatkan konduktivitas listriknya. Analisis EDX dilakukan untuk menentukan komposisi elemental material. Sistem EDX yang terintegrasi dalam SEM digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur elemen-elemen yang ada di permukaan sampel. Data EDX memberikan informasi kuantitatif tentang distribusi elemen-elemen tersebut. Pengukuran EDX dilakukan pada beberapa titik di permukaan sampel untuk memastikan keseragaman komposisi. Hasil analisis SEM-EDX digunakan untuk memverifikasi keberadaan elemen-elemen penting dalam Zn-LHS dan distribusi mereka setelah proses sintesis dan adsorpsi.

#### Uji stabilitas Zn-LHS

Uji stabilitas Zn-LHS mengikuti Velázquez-Carriles et al., (2020) dengan modifikasi. Sebanyak 20 mg Zn-LHS ditambahkan ke dalam 20 mL larutan dengan pH yang bervariasi dari 1 hingga 12. Campuran diaduk selama 120 menit, kemudian disaring, dan filtrat yang diperoleh dianalisis untuk kandungan Zn menggunakan AAS. Data stabilitas Zn-LHS dianalisis dengan membandingkan jumlah Zn yang terlepas pada berbagai kondisi pH. Grafik stabilitas Zn-LHS pada berbagai pH dibuat untuk menggambarkan stabilitas material. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali.

$$\text{Stabilitas Zn-LHS (\%)} = \left( 1 - \frac{Zn(II)_{terlarut}}{Zn(II)_{awal}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Di mana, Zn(II) terlarut adalah konsentrasi Zn(II) yang terdeteksi dalam larutan setelah uji stabilitas pada pH tertentu. Sedangkan, jumlah Zn(II) awal

adalah jumlah total Zn(II) yang ada dalam Zn-LHS sebelum uji stabilitas (Rojas et al., 2015).

### Studi pH pada adsorpsi MO

Studi pH pada adsorpsi MO mengikuti (Rojas et al., (2015) dengan modifikasi. Untuk menentukan pH optimum, 10 mg Zn-LHS ditambahkan ke dalam 10 mL larutan MO dengan konsentrasi yang sama (10 ppm), dengan variasi pH sebesar 3, 4, 5, 7, 8, dan 10. Campuran diaduk selama 90 menit dan kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman 42. Filtrat yang diperoleh diukur pH-nya

dan dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Kapasitas adsorpsi pada berbagai pH dihitung untuk menentukan pH optimum adsorpsi MO. Grafik pengaruh pH terhadap adsorpsi MO oleh Zn-LHS dibuat untuk menentukan pH optimum adsorpsi. Kapasitas adsorpsi yang paling besar menunjukkan pH optimum adsorpsi. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sintesis dan Karakterisasi Zn-LHS

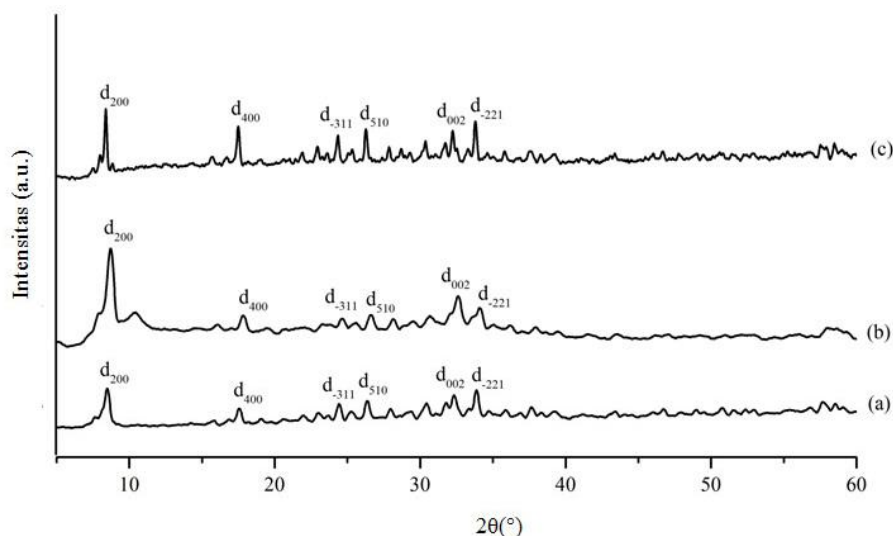
Material Zn-LHS disintesis menggunakan metode kopresipitasi, yang bergantung pada teknik sintesis dengan pengendapan melalui penambahan larutan basa (J. Wang & Xu, 2023). Dalam penelitian ini, dilakukan variasi rasio mol -OH/Zn dalam sintesis Zn-LHS. Zn-LHS dengan variasi rasio mol tertentu kemudian digunakan sebagai adsorben MO. Zn-LHS hasil sintesis berupa serbuk berwarna putih. Padatan Zn-LHS dikarakterisasi menggunakan difraktogram sinar-X untuk menentukan puncak-puncak utama dan kristalinitas Zn-LHS. Karakterisasi dilakukan dengan membandingkan difraktogram Zn-LHS hasil sintesis dengan ICDD Zn-LHS nomor 01-072-0627. Karakterisasi Zn-LHS dilakukan dengan membandingkan nilai basal *spacing* dari puncak difraksi dengan intensitas

tertinggi dalam Zn-LHS variasi rasio mol -OH/Zn dengan data ICDD. Tabel 1 menunjukkan perbandingan nilai basal *spacing* dari puncak difraksi dengan intensitas tertinggi dalam Zn-LHS metode kopresipitasi dengan variasi mol -OH/Zn. Berdasarkan data tersebut, Zn-LHS dengan rasio 0,6 memiliki nilai basal *spacing* yang paling mendekati data pada ICDD. Puncak utama pada rasio 0,6 terletak pada  $8,86^\circ$  ( $2\theta$ ) dengan basal *spacing* 9,78 Å, menunjukkan pola difraksi dari bidang (200). Pergeseran nilai basal *spacing* lebih banyak terjadi pada Zn-LHS dengan rasio 0,3 dan 0,9, di mana puncak utamanya memiliki nilai basal *spacing* masing-masing 10,36 Å dan 10,22 Å. Hasil ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Machovsky et al., (2013) yang melaporkan basal *spacing* sebesar 10,37-10,82 Å.

**Tabel 1.** Parameter karakterisasi Zn-LHS metode kopresipitasi dengan XRD

Rasio mol -OH/Zn	$d_{200}$ (Å)	JCPDS $d_{200}$ (Å)	$\Sigma$ Intensitas (hitung)*	% Kristalinitas
0,3	10,36	9,09	3231	16
0,6	9,78	9,09	2785	39
0,9	10,22	9,09	1179	45

\*Hasil penjumlahan dari enam puncak dengan intensitas tertinggi dalam difraktogram Zn-LHS hasil sintesis



**Gambar 1.** Difraktogram Zn-LHS dengan variasi rasio mol -OH/Zn = 0,3 (a) 0,6 (b) dan 0,9 (c)

Difraktogram Zn-LHS metode kopresipitasi pada Gambar 1 menunjukkan bahwa hasil variasi rasio mol -OH/Zn memiliki pola difraksi yang mirip, dengan perbedaan terletak pada nilai basal *spacing* serta intensitas dari masing-masing puncak difraksi yang terdeteksi. Dalam penelitian ini, kristalinitas Zn-LHS ditentukan dengan menjumlahkan intensitas dari enam puncak difraksi. Hal ini dilakukan karena difraktogram sampel tidak dibandingkan terhadap suatu material standar, tetapi hanya dibandingkan antar sampel material dari variasi rasio mol -OH/Zn. Metode penjumlahan intensitas seperti ini pernah dilakukan oleh Prasetyoko et al., (2012) untuk membandingkan kristalinitas suatu material.

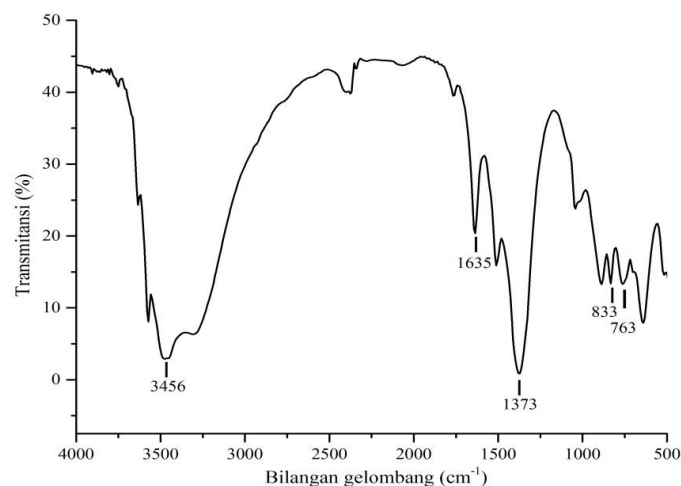
Dari perhitungan kristalinitas, Zn-LHS dengan rasio 0,9 memiliki nilai kristalinitas tertinggi, yaitu sebesar 45%. Meskipun difraktogram Zn-LHS dengan rasio 0,9 memiliki nilai kristalinitas yang tinggi, terdapat puncak tambahan pada  $29,13^\circ$  ( $2\theta$ ) dengan intensitas yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan puncak karakteristik Zn-LHS pada  $d_{510}$  dan  $d_{002}$ . Menurut ICDD nomor 00-001-0360, puncak tersebut merupakan puncak karakteristik dari  $Zn(OH)_2$ . Kemungkinan adanya fasa lain pada Zn-LHS dengan rasio 0,9 mungkin disebabkan oleh penambahan OH yang berlebihan. Top dan Çetinkaya (2015) telah melaporkan bahwa penambahan basa yang berlebih mengakibatkan penambahan puncak pada  $2\theta$   $29^\circ$ .

Sementara itu, pada difraktogram Zn-LHS dengan rasio 0,6 dan 0,3, tidak terdapat puncak karakteristik dari fasa lain, menunjukkan bahwa Zn-

LHS dengan rasio 0,6 dan 0,3 memiliki kemurnian yang lebih baik. Dalam konteks adsorpsi MO oleh Zn-LHS, sintesis dengan kemurnian yang lebih tinggi lebih diinginkan untuk meningkatkan efektivitas Zn-LHS sebagai adsorben (Murachman et al., 2014).

Analisis dengan FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan anion yang mengisi daerah antar lapis pada senyawa Zn-LHS (Gordeeva et al., 2020). Spektrum FTIR Zn-LHS yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi dalam penelitian ini terlihat pada Gambar 2. Spektra FTIR Zn-LHS hasil sintesis metode kopresipitasi menunjukkan puncak lebar di sekitar bilangan gelombang 3456  $cm^{-1}$ , yang mengindikasikan vibrasi rentang gugus -OH dan molekul air yang terdapat pada daerah antar lapis Zn-LHS (Gordeeva et al., 2020). Menurut Gordeeva et al., (2020), puncak pada bilangan gelombang sekitar 3000  $cm^{-1}$  mewakili serapan ikatan hidrogen antara H-O-H dan anion di daerah antar lapis.

Pada Zn-LHS hasil sintesis terdapat puncak pada bilangan gelombang 1635  $cm^{-1}$ , yang mengindikasikan vibrasi tekukan H-O-H dari molekul air (Muda et al., 2018). Pada spektra FTIR Zn-LHS dengan metode kopresipitasi, puncak pada bilangan gelombang 1373  $cm^{-1}$  merupakan serapan vibrasi rentang asimetris dari ion nitrat di daerah antar lapis Zn-LHS. Keberadaan ion nitrat juga tercermin dalam puncak serapan pada bilangan gelombang 833  $cm^{-1}$ , yang menunjukkan vibrasi rentang asimetris dan simetris dari ion nitrat (Verma & Deb, 2007).



**Gambar 2.** Spektrum FTIR Zn-LHS hasil sintesis

Karakterisasi menggunakan SEM bertujuan untuk mengamati morfologi permukaan Zn-LHS, sedangkan EDX digunakan untuk menentukan persentase masing-masing unsur dalam Zn-LHS. Gambar 3 menunjukkan citra SEM dari Zn-LHS yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi dengan perbesaran 5000 kali. Berdasarkan citra SEM, Zn-LHS yang disintesis melalui metode kopresipitasi memiliki bentuk lempengan bulat

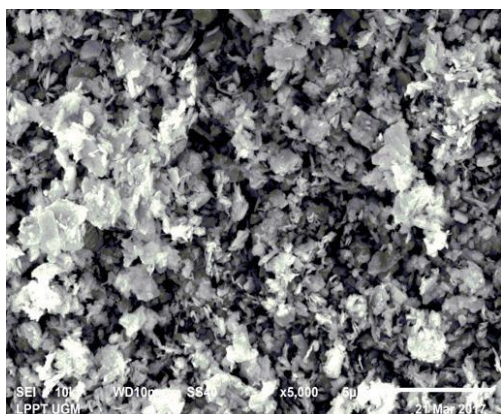
pipih dengan diameter partikel rata-rata sekitar 2  $\mu m$  dan standar deviasi 0,30. Citra SEM menunjukkan bahwa Zn-LHS memiliki fase kristalin yang didukung oleh hasil XRD, yang menunjukkan adanya nilai persentase kristalinitas. Berdasarkan hasil analisis EDX, persentase massa unsur-unsur yang terdapat dalam Zn-LHS metode kopresipitasi disajikan pada Tabel 2.



**Tabel 2.** Persentase massa unsur dalam Zn-LHS metode kopresipitasi

Unsur	% Unsur
Zn	55,62
N	9,20
O	35,18

Persentase massa unsur Zn dalam Zn-LHS mengindikasikan keberadaan kation logam Zn(II) dalam struktur Zn-LHS. Analisis EDX menunjukkan bahwa unsur-unsur penyusun Zn-LHS metode kopresipitasi adalah Zn, N, dan O. Keberadaan anion nitrat di antara lapisan-lapisan ditunjukkan oleh adanya unsur N dan O. Hal ini didukung oleh hasil FTIR yang menunjukkan adanya pita serapan pada bilangan gelombang 833  $\text{cm}^{-1}$ . Selain itu, persentase massa unsur O juga mengindikasikan keberadaan gugus hidroksi dalam struktur Zn-LHS serta molekul air di antara lapisan-lapisannya. Hasil ini didukung oleh data FTIR yang menunjukkan adanya pita serapan untuk gugus fungsi -OH dan H-O-H. Hasil SEM EDX ini sesuai dengan penelitian yang dilaporkan Kusrini et al., (2023).

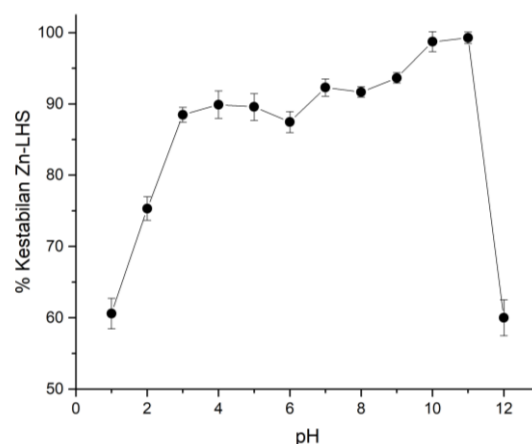


**Gambar 3.** Citra SEM Zn-LHS metode kopresipitasi

### Uji Stabilitas Zn-LHS

Uji stabilitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pH larutan terhadap stabilitas Zn-LHS. Stabilitas bahan tersebut dinilai dengan menambahkan Zn-LHS ke dalam akuades pada berbagai pH dan dibandingkan dengan larutan standar Zn(II). Logam Zn pada Zn-LHS memiliki struktur yang rusak apabila berinteraksi larutan pada pH tertentu. Kerusakan ini ditandai dengan lepasnya logam Zn pada struktur Zn-LHS dan membentuk Zn(II) yang larut pada lautan pH. Setelah interaksi, larutan yang dihasilkan disaring dan filtratnya dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan jumlah Zn(II) yang terlepas relatif terhadap berat adsorben awal.

Dari grafik uji stabilitas pada Gambar 4, terlihat bahwa pada pH di bawah 2, stabilitas Zn-LHS cenderung menurun dari sekitar 87% pada pH 3 menjadi 75% pada pH 2, dan mencapai 60% pada pH 1. Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan jumlah ion  $\text{H}^+$  dalam larutan, yang menginduksi protonasi gugus hidroksi dalam Zn-LHS. Protonasi tersebut mengakibatkan lepasnya anion dari daerah antar lapis dan melemahnya ikatan antara gugus hidroksi dengan Zn pada lapisan oktahedral Zn-LHS, sehingga terjadi pelarutan kation logam dari Zn-LHS (Rojas et al., 2005). Di sisi lain, pada pH di atas 2, protonasi gugus hidroksi menjadi lebih sedikit, sehingga tidak cukup untuk melarutkan adsorben. Berdasarkan hasil uji stabilitas, Zn-LHS yang disintesis menunjukkan stabilitas yang relatif lebih tinggi pada pH di atas 2, dengan tingkat stabilitas mencapai 99% pada pH 11 dan hasil ini sesuai dengan yang diperoleh Rojas et al., (2005).



**Gambar 4.** Grafik stabilitas Zn-LHS pada berbagai pH

Analisis data stabilitas menunjukkan bahwa hasil pengukuran cukup konsisten dengan nilai standar deviasi yang rendah dan nilai rata-rata yang stabil di berbagai pH. Untuk setiap nilai pH, standar deviasi (SD) memberikan gambaran tentang variabilitas data yang spesifik. Pada pH 1, nilai SD adalah 2,14, menunjukkan variabilitas yang moderat. Pada pH 2, nilai SD adalah 1,65, menandakan konsistensi yang lebih baik dari pH 1, artinya data lebih dekat ke nilai rata-rata dengan fluktuasi yang lebih kecil. Nilai SD yang paling rendah ada pada pH 3 yaitu 1,05, yang mencerminkan data yang paling konsisten di sekitar rata-rata, dengan variabilitas yang sangat rendah. Pada pH 4 dan pH 5, nilai SD masing-masing adalah 1,92 dan 1,88, menunjukkan variabilitas yang sedikit lebih tinggi namun tetap dalam batas yang dapat diterima.

Pengujian Relative Standard Deviation (RSD) menunjukkan konsistensi yang baik dengan sebagian besar nilai berada di bawah 5%. Secara spesifik, RSD pada berbagai nilai pH adalah sebagai

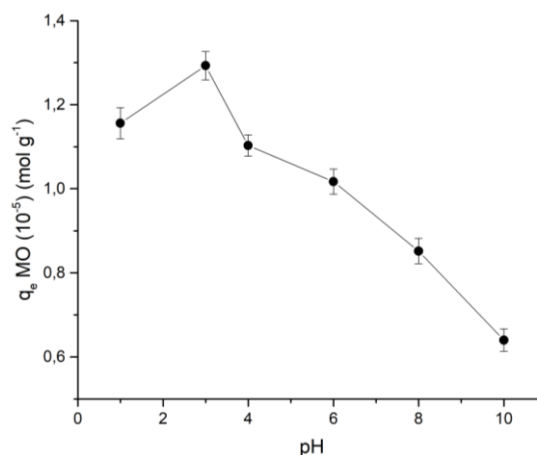
berikut: pH 1 memiliki RSD sebesar 3,43%, pH 2 sebesar 2,19%, pH 3 sebesar 1,18%, pH 4 sebesar 2,13%, dan pH 5 sebesar 2,10%. Hasil kestabilan pH memiliki keterkaitan dengan morfologi dan karakteristik Zn-LHS yang telah dilakukan menggunakan XRD, SEM, dan FTIR. Zn-LHS menunjukkan kestabilan yang lebih baik pada pH di atas 2. Karakteristik morfologi yang ditunjukkan oleh SEM, dengan bentuk lempengan bulat pipih dan diameter partikel rata-rata sekitar  $2 \pm 0,3 \mu\text{m}$ , mendukung kestabilan struktural Zn-LHS. Analisis XRD menunjukkan bahwa Zn-LHS dengan rasio mol  $-\text{OH}/\text{Zn}$  0,6 memiliki nilai kristalinitas yang lebih tinggi, yang mengindikasikan kestabilan kristalin yang baik.

FTIR mengidentifikasi gugus fungsi yang ada dalam Zn-LHS, seperti vibrasi rentang gugus  $-\text{OH}$  dan molekul air yang terdapat pada daerah antar lapis. Gugus fungsi ini berperan dalam pembentukan zona kristalin yang stabil, sehingga mempengaruhi kestabilan Zn-LHS dalam berbagai kondisi pH. Pada pH rendah, protonasi gugus hidroksi mengakibatkan lepasnya anion dari daerah antar lapis dan melemahnya ikatan antara gugus hidroksi dengan Zn pada lapisan oktahedral Zn-LHS, menyebabkan penurunan stabilitas. Di sisi lain, pada pH yang lebih tinggi, ion  $\text{OH}^-$  bersaing dengan MO untuk situs adsorpsi, tetapi stabilitas Zn-LHS tetap terjaga karena interaksi ionik yang kuat.

### Optimasi pH pada adsorpsi MO

Studi mengenai pengaruh keasaman medium bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana pH larutan memengaruhi pola adsorpsi MO oleh Zn-LHS hasil sintesis (Sriyanti et al., 2005). Gambar 5 menampilkan grafik pola adsorpsi MO terhadap variasi pH. Gambar 5 menunjukkan bahwa adsorpsi MO pada Zn-LHS mencapai optimum pada pH 3. Pada pH 1 stabilitas Zn-LHS mengalami penurunan. Pada kondisi asam LHS terlarut akibat kerusakan struktur, namun berangsur-angsur mengalami peningkatan seiring peningkatan pH, hal tersebut ditunjukkan dengan persen kestabilan Zn-LHS yang rendah pada pH 1.

Hal ini didukung oleh hasil penelitian Saidah & Zainuri, (2012) yang melaporkan bahwa Zn memiliki kelarutan terbesar pada pH 1. Pada pH 3, muatan positif dari situs tetrahedral Zn pada Zn-LHS bersifat lebih positif karena adanya protonasi pada gugus hidroksi (Wijaya et al., 2020). Sementara MO dalam larutan menjadi bermuatan negatif karena mengalami ionisasi (Mulyati & Panjaitan, 2021). Perbedaan muatan antara Zn-LHS dan MO menghasilkan interaksi elektrostatik.



**Gambar 5.** Pengaruh pH pada adsorpsi MO

Ketika pH larutan naik dari 3 ke 10, kapasitas adsorpsi MO terhadap Zn-LHS hasil sintesis menurun dari  $1,213 \times 10^{-5} \text{ mol g}^{-1}$  menjadi  $0,714 \times 10^{-5} \text{ mol g}^{-1}$ . Penurunan ini disebabkan oleh penurunan muatan positif pada permukaan adsorben dan peningkatan muatan negatif karena deprotonasi gugus  $\text{OH}^-$  dari Zn-LHS hidroksi (Wijaya et al., 2020). Muatan negatif pada permukaan adsorben tidak menguntungkan untuk adsorpsi zat warna anionik berdasarkan prinsip tolakan elektrostatik. Selain itu, pada pH basa terdapat ion  $\text{OH}^-$  yang berkompetisi dengan zat warna dalam proses adsorpsi, sehingga kapasitas adsorpsi turun secara signifikan (Okareh et al., 2015).

Perubahan pH setelah interaksi, seperti yang terlihat pada Tabel 2, dipengaruhi oleh keberadaan ion  $\text{H}^+$  dan  $\text{OH}^-$  dalam larutan. Pada pH awal asam, pH larutan menjadi basa setelah interaksi karena ion  $\text{H}^+$  digunakan untuk memprotonasi gugus hidroksi pada Zn-LHS. Pada pH awal basa, pH larutan menurun setelah interaksi karena terjadi pertukaran anion antara  $\text{NO}_3^-$  pada daerah antar lapis Zn-LHS dengan ion  $\text{OH}^-$  dalam larutan (Gordeeva et al., 2020). Ion  $\text{OH}^-$  memiliki afinitas yang lebih besar terhadap daerah antar lapis Zn-LHS, sehingga  $\text{NO}_3^-$  dapat dipertukarkan dengan mudah. Proses ini menyebabkan penurunan pH larutan karena pengurangan ion  $\text{OH}^-$  di dalamnya (Gordeeva et al., 2020). Analisis data kapasitas adsorpsi menunjukkan bahwa hasil pengukuran cukup konsisten dengan nilai standar deviasi yang rendah dan nilai rata-rata yang stabil di berbagai pH. Untuk setiap nilai pH, SD memberikan gambaran tentang variabilitas data yang spesifik. Pada pH 1, nilai SD adalah 0,037, menunjukkan variabilitas yang moderat. Variabilitas moderat ini berarti bahwa data cenderung tersebar di sekitar nilai rata-rata dengan sedikit fluktuasi, yang masih dapat dianggap konsisten. Pada pH 3, nilai SD menurun menjadi 0,034, menandakan konsistensi yang lebih baik dengan fluktuasi yang lebih kecil. Pada pH 4, SD adalah 0,025 yang merupakan variabilitas paling rendah di antara semua nilai pH, menandakan data

yang sangat konsisten. Pada pH 6, nilai SD adalah 0,030, menunjukkan variabilitas yang sedikit lebih tinggi dibandingkan pH 4 namun tetap dalam batas yang dapat diterima. Variabilitas yang sedikit lebih tinggi ini berarti bahwa data memiliki fluktuasi yang lebih besar dibandingkan pH 4, namun fluktuasi tersebut masih dalam rentang yang wajar dan tidak mengindikasikan adanya ketidakstabilan yang signifikan. Pada pH 8, nilai SD adalah 0,028, menunjukkan variabilitas yang rendah dan konsisten. Pada pH 10, nilai SD adalah 0,033, menunjukkan variabilitas yang sedikit lebih tinggi namun tetap dalam batas yang dapat diterima (Ulfiati, R, Tri Purnami, 2017).

Pengujian RSD digunakan untuk memberikan perspektif mengenai variabilitas relatif terhadap rata-rata. Nilai RSD dihitung dengan membagi standar deviasi dengan nilai rata-rata dan dikalikan dengan 100%. Dalam data ini, nilai RSD menunjukkan konsistensi yang baik dengan sebagian besar nilai berada di bawah 5% (Sulistiyani et al., 2021). Secara spesifik, RSD pada berbagai nilai pH adalah sebagai berikut: pH 1 memiliki RSD sebesar 3,20%, pH 3 sebesar 2,62%, pH 4 sebesar 2,30%, pH 6 sebesar 2,95%, pH 8 sebesar 2,84%, dan pH 10 sebesar 3,12%.

**Tabel 3.** Data pH larutan sebelum dan setelah interaksi MO dengan Zn-LHS

pH	
Sebelum	Sesudah
1,08±0,07	6,25±0,06
3,02±0,07	6,29±0,05
4,08±0,03	6,58±0,04
6,05±0,07	6,45±0,03
8,15±0,08	6,74±0,08
10,16±0,08	7,40±0,07

Perubahan pH setelah interaksi, seperti yang terlihat pada Tabel 3, dipengaruhi oleh keberadaan ion H<sup>+</sup> dan OH<sup>-</sup> dalam larutan. Pada pH awal asam, pH larutan menjadi basa setelah interaksi karena ion H<sup>+</sup> digunakan untuk memprotonasi gugus hidroksi pada Zn-LHS. Pada pH awal basa, pH larutan menurun setelah interaksi karena terjadi pertukaran anion antara NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pada daerah antar lapis Zn-LHS dengan ion OH<sup>-</sup> dalam larutan. Ion OH<sup>-</sup> memiliki afinitas yang lebih besar terhadap daerah antar lapis Zn-LHS, sehingga NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dapat dipertukarkan dengan mudah. Proses ini menyebabkan penurunan pH larutan karena pengurangan ion OH<sup>-</sup> di dalamnya. Secara keseluruhan, data pH sebelum dan sesudah proses adsorpsi menunjukkan konsistensi yang baik dengan nilai standar deviasi yang rendah. Variabilitas dalam hasil pengukuran berada dalam batas yang wajar, menunjukkan bahwa metode pengukuran dan kondisi pengujian stabil.

## KESIMPULAN

Zn-LHS telah berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Berdasarkan evaluasi terhadap kristalinitas dan kemurnian material, Zn-LHS yang dipilih untuk kajian adsorpsi MO adalah Zn-LHS hasil sintesis dengan rasio mol -OH/Zn sebesar 0,6. Dalam penelitian ini, Zn-LHS hasil sintesis menunjukkan kapasitas adsorpsi sebesar 1,213 x 10<sup>-5</sup> mol g<sup>-1</sup>. Pentingnya memilih kondisi lingkungan yang sesuai, proses adsorpsi MO dengan Zn-LHS hasil sintesis menunjukkan efektivitas maksimum pada pH 3. Pengukuran SEM menunjukkan bahwa Zn-LHS memiliki bentuk lempengan bulat pipih dengan diameter partikel rata-rata sekitar 2 ± 0,3 µm. Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan dengan mengoptimalkan Zn-LHS untuk aplikasi dalam kondisi lingkungan yang lebih kompleks, memanfaatkan teknik karakterisasi lanjutan untuk memahami mekanisme adsorpsi, dan mengintegrasikan Zn-LHS dengan material lain untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan stabilitas. Evaluasi aplikasi praktis Zn-LHS dalam skala industri juga diperlukan untuk memastikan efektivitas dan keberlanjutannya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aljuaid, A., Almeahmadi, M., Alsaiani, A. A., Allahyani, M., Abdulaziz, O., Alsharif, A., Alsaiani, J. A., Saih, M., Alotaibi, R. T., & Khan, I. (2023). g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Based Photocatalyst for the Efficient Photodegradation of Toxic Methyl Orange Dye: Recent Modifications and Future Perspectives. *Molecules*, 28(7). <https://doi.org/10.3390/molecules28073199>
- Barciela, P., Perez-Vazquez, A., & Prieto, M. A. (2023). Azo dyes in the food industry: Features, classification, toxicity, alternatives, and regulation. *Food and Chemical Toxicology*, 178, 113935. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113935>
- Da Silva, M. L. N., Marangoni, R., Cursino, A. C. T., Schreiner, W. H., & Wypych, F. (2012). Colorful and transparent poly(vinyl alcohol) composite films filled with layered zinc hydroxide salts, intercalated with anionic orange azo dyes (methyl orange and orange II). *Materials Chemistry and Physics*, 134(1), 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.03.007>
- de Souza dos Santos, G. E., dos Santos Lins, P. V., de Magalhães Oliveira, L. M. T., da Silva, E. O., Anastopoulos, I., Erto, A., Giannakoudakis, D. A., de Almeida, A. R. F., da Silva Duarte, J. L., & Meili, L. (2021). Layered double hydroxides/biochar composites as adsorbents for water remediation applications: recent trends and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124755.



- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124755>
- Emmanuel, S. S., Adesibikan, A. A., Opatola, E. A., & Olawoyin, C. O. (2023). A pragmatic review on photocatalytic degradation of methyl orange dye pollutant using greenly biofunctionalized nanometallic materials: A focus on aquatic body. *Applied Organometallic Chemistry*, 37(7), e7108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aoc.7108>
- Farhan Hanafi, M., & Sapawe, N. (2020). A review on the water problem associate with organic pollutants derived from phenol, methyl orange, and remazol brilliant blue dyes. *Materials Today: Proceedings*, 31, A141–A150. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.258>
- Gordeeva, A., Hsu, Y.-J., Jenei, I. Z., Brant Carvalho, P. H. B., Simak, S. I., Andersson, O., & Häussermann, U. (2020). Layered Zinc Hydroxide Dihydrate, Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>10</sub>·2H<sub>2</sub>O, from Hydrothermal Conversion of ε-Zn(OH)<sub>2</sub> at Gigapascal Pressures and its Transformation to Nanocrystalline ZnO. *ACS Omega*, 5(28), 17617–17627. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02075>
- Gufuran, M., & Mawardi, M. (2019). Dampak Pembuangan Limbah Domestik terhadap Pencemaran Air Tanah di Kabupaten Pidie Jaya. *Jurnal Serambi Engineering*, 4(1), 416. <https://doi.org/10.32672/jse.v4i1.852>
- Jaerger, S., de Ramos Nogueira, D. A., de Oliveira, D. S., Machado, M. V., & Marangoni, R. (2021). Study of Different Morphology of Zinc Hydroxide Salt as Adsorbent of Azo Dyes. *ChemistrySelect*, 6(17), 4354–4367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/slct.202100730>
- Kusrini, E., Wilson, L. D., Padmosoedarso, K. M., Mawarni, D. P., Sufyan, M., & Usman, A. (2023). Synthesis of Chitosan Capped Zinc Sulphide Nanoparticle Composites as an Antibacterial Agent for Liquid Handwash Disinfectant Applications. *Journal of Composites Science*, 7(2).
- Machovsky, M., Kuritka, I., Sedlak, J., & Pastorek, M. (2013). Hexagonal ZnO porous plates prepared from microwave synthesized layered zinc hydroxide sulphate via thermal decomposition. *Materials Research Bulletin*, 48(10), 4002–4007. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.06.018>
- Mittal, J. (2021). Recent progress in the synthesis of Layered Double Hydroxides and their application for the adsorptive removal of dyes: A review. *Journal of Environmental Management*, 295, 113017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113017>
- Morais de Faria, J., Alkimin Muniz, L., Z. Netto, J. F., Scheres Firak, D., B. De Sousa, F., & da Silva Lisboa, F. (2021). Application of a hybrid material formed by layered zinc hydroxide chloride modified with spiropyran in the adsorption of Ca<sup>2+</sup> from water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 631, 127738. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127738>
- Muda, Z., Hashim, N., Isa, I. M., Ali, N. M., Bakar, S. A., Mamat, M., Hussein, M. Z., Bakar, N. A., & Mahamod, W. R. W. (2018). Synthesis and characterization of carbamate insecticideintercalated zinc layered hydroxide modified with sodium dodecyl sulphate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 440(1), 0–13. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/440/1/012003>
- Mulyati, B., & Panjaitan, R. S. (2021). Indonesian Journal of Chemical Research. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 9(2), 129–136.
- Murachman, B., Putra, S. E., & Wulandary. (2014). Dekolorisasi dan Deoilisasi Parafin menggunakan Adsorben Zeolit, Arang Aktif dan Produk Pirolisis Batu Bara. *Jurnal Rekayasa Proses*, 8(2), 40.
- Okareh, O. T., Timothy, A., & Dada, A. O. (2015). Adsorption of Chromium Ion from Industrial Effluent Using Activated Carbon Derived from Plantain. *American Journal of Environmental Protection*, 4, 7–20.
- Oosthuizen, H., Jones, L., Naseem, S., Labuschagne, F. J. W. J., & Leuteritz, A. (2023). Tailoring materials for their need: Sustainable layered double hydroxide polymer composites. *Journal of Polymer Science*, 61(16), 1749–1777. <https://doi.org/10.1002/pol.20230025>
- Prasetyoko, D., Ayunanda, N., Fansuri, H., Hartanto, D., & Ramli, Z. (2012). Phase Transformation of Rice Husk Ash in the Synthesis of ZSM-5 without Organic Template. *ITB Journal of Sciences*, 44, 250–262. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2012.44.3.5>
- Rojas, R., Arandigoyen, M., De Pauli, C., Ulibarri, M. A., & Avena, M. (2005). Surface-charging behavior of Zn-Cr layered double hydroxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 280, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.045>
- Rojas, R., Linck, Y. G., Cuffini, S. L., Monti, G. A., & Giacomelli, C. E. (2015). Structural and physicochemical aspects of drug release from layered double hydroxides and layered hydroxide salts. *Applied Clay Science*, 109–110, 119–126.

- <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.030>
- Saidah, I. N., & Zainuri, M. (2012). Pengaruh Variasi pH Pelarut HCl Pada Sintesis Barium M-Heksaferrit Dengan Doping Zn (BaFe<sub>11</sub>4Zn0,6O<sub>19</sub>) Menggunakan Metode Kopresipitasi. *Sains Dan Seni*, 1(1), 41–46.
- Senthil Kumar, P., Janet Joshiba, G., Femina, C. C., Varshini, P., Priyadharshini, S., Arun Karthick, M. S., & Jothirani, R. (2019). A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 172, 395–416.  
<https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24613>
- Silveira, E., Marques, P. P., Silva, S. S., Porto, A., & Tambourgi, E. (2009). Selection of Pseudomonas for industrial textile dyes decolourization. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63, 230–235.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.09.007>
- Sriyanti, S., Taslimah, T., Nuryono, N., & Narsito, N. (2005). Pengaruh Keasaman Medium dan Imobilisasi Gugus Organik pada Karakter Silika Gel dari Abu Sekam Padi. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 8, 74–80.  
<https://doi.org/10.14710/jksa.8.3.74-80>
- Sulistiyani, M., Kusumastuti, E., Huda, N., & Mukhayani, F. (2021). Method Validation on Functional Groups Analysis of Geopolymer with Polyvinyl Chloride (PVC) as Additive Using Fourier Transform Infrared (FT-IR). *Indonesian Journal of Chemical Science*, 10(3), 198–205.  
<http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- Tkaczyk, A., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, 717, 137222.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>
- Top, A., & Çetinkaya, H. (2015). Zinc oxide and zinc hydroxide formation via aqueous precipitation: Effect of the preparation route and lysozyme addition. *Materials Chemistry and Physics*, 167, 77–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.10.013>
- Ulfiati, R., Tri Purnami, dan R. M. K. (2017). Faktor yang Mempengaruhi Presisi dan Akurasi Data Hasil Uji dalam Menentukan Kompetensi Laboratorium. *Jurnal Lemigas*, 51(1), 6–7.  
<http://www.journal.lemigas.esdm.go.id>
- Velázquez-Carriles, C. A., Carbajal-Arizaga, G. G., Silva-Jara, J. M., Reyes-Becerril, M. C., Aguilar-Uscanga, B. R., & Macías-Rodríguez, M. E. (2020). Chemical and biological protection of food grade nisin through their partial intercalation in laminar hydroxide salts. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3252–3258.  
<https://doi.org/10.1007/s13197-020-04356-y>
- Verma, S., & Deb, M. (2007). Nondestructive and rapid determination of nitrate in soil, dry deposits and aerosol samples using KBr-matrix with diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (DRIFTS). *Analytica Chimica Acta*.  
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.09.020>
- Wang, J., & Xu, B. (2023). Removal of radionuclide <sup>99</sup>Tc from aqueous solution by various adsorbents: A review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 270, 107267.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107267>
- Wang, L., Shi, C., Wang, L., Pan, L., Zhang, X., & Zou, J.-J. (2020). Rational design{,} synthesis{,} adsorption principles and applications of metal oxide adsorbents: a review. *Nanoscale*, 12(8), 4790–4815.  
<https://doi.org/10.1039/C9NR09274A>
- Wijaya, I. K., Farra Yulia, Y., & Udyani, K. (2020). Pemanfaatan Daun Teh Sebagai Biosorben Logam Berat Dalam Air Limbah (Review). *Jurnal Envirotek*, 12(2), 25–33.  
<https://doi.org/10.33005/envirotek.v12i2.55>
- Yang, C., Yu, J., Huang, B., Miao, G., & Xiao, J. (2023). Boosting deep desulfurization of heavy mercaptan using layered intercalated Zn-based hydroxide adsorbents. *Separation and Purification Technology*, 307, 122860.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122860>
- Zhang, T., Wang, W., Zhao, Y., Bai, H., Wen, T., Kang, S., Song, G., Song, S., & Komarneni, S. (2021). Removal of heavy metals and dyes by clay-based adsorbents: From natural clays to 1D and 2D nano-composites. *Chemical Engineering Journal*, 420, 127574.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127574>