



## Tinjauan Komprehensif: Sintesis dan Karakterisasi Kompleks Zn(II)

Meilina Nur Cahya, Adelia Apriska Lira, Calista Amelia Putri\*, Intan Nur Jannah, Camila Azzahro

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta  
Jl. Marsda Adisucipto Yogyakarta 55281 Telp. +62-274-540971  
Email: calistatata10@gmail.com\*

**Abstrak.** Senyawa kompleks Zn(II) merupakan salah satu kelompok senyawa koordinasi yang banyak dikaji karena memiliki kestabilan yang baik, bersifat non-redoks, relatif tidak toksik, serta menunjukkan fleksibilitas geometri koordinasi yang tinggi. Karakteristik tersebut menjadikan kompleks Zn(II) berpotensi luas untuk dikembangkan dalam berbagai bidang, seperti kimia koordinasi, material, lingkungan, dan biologi. Artikel review ini bertujuan untuk menganalisis dan merangkum hasil penelitian mengenai sintesis kompleks Zn(II) yang telah dipublikasikan pada jurnal nasional maupun internasional. Fokus pembahasan meliputi jenis ligan yang digunakan, metode sintesis, teknik karakterisasi, serta sifat dan aplikasinya. Ligan yang umum digunakan antara lain ligan organik dan polidentat seperti Schiff base, EDTA, flavonoid, serta ligan heterosiklik. Metode sintesis yang paling banyak diterapkan adalah metode larutan dengan pengendalian kondisi reaksi, seperti jenis pelarut, pH, suhu, dan rasio molar logam terhadap ligan. Teknik karakterisasi yang sering digunakan meliputi FTIR, UV-Vis, XRD, analisis termal, dan pengukuran konduktivitas. Kompleks Zn(II) yang dihasilkan banyak diaplikasikan sebagai antibakteri, inhibitor enzim, material fungsional, serta agen lingkungan. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa ligan dengan atom donor nitrogen dan oksigen berperan penting dalam menentukan stabilitas serta geometri koordinasi kompleks, baik tetrahedral maupun oktahedral. Secara umum, pembentukan kompleks dengan ion Zn(II) mampu meningkatkan sifat fungsional dan kestabilan senyawa dibandingkan ligan bebasnya.

**Kata kunci:** sintesis, senyawa koordinasi, Zn(II) kompleks

**Abstrak.** Zn(II) complex compounds are one of the most studied coordination compounds because they have good stability, are non-redox, are relatively non-toxic, and exhibit high coordination geometry flexibility. These characteristics make Zn(II) complexes have broad potential for development in various fields, such as coordination chemistry, materials, environment, and biology. This review article aims to analyze and summarize research results on the synthesis of Zn(II) complexes that have been published in national and international journals. The focus of the discussion includes the types of ligands used, synthesis methods, characterization techniques, and their properties and applications. Commonly used ligands include organic and polydentate ligands such as Schiff base, EDTA, flavonoids, and heterocyclic ligands. The most widely applied synthesis method is the solution method with control of reaction conditions, such as solvent type, pH, temperature, and molar ratio of metal to ligand. Characterization techniques frequently used include FTIR, UV-Vis, XRD, thermal analysis, and conductivity measurements. The resulting Zn(II) complexes are widely applied as antibacterials, enzyme inhibitors, functional materials, and environmental agents. The review results indicate that ligands with nitrogen and oxygen donor atoms play an important role in determining the stability and coordination geometry of complexes, both tetrahedral and octahedral. In general, complex formation with Zn(II) ions can improve the functional properties and stability of compounds compared to the free ligands.

**Kata kunci:** synthesis, coordination compound, Zn(II) complex

## Pendahuluan

Senyawa kompleks merupakan senyawa kimia yang terbentuk melalui ikatan koordinasi antara ion logam pusat sebagai akseptor elektron dengan ligan sebagai donor elektron. Senyawa koordinasi adalah molekul yang mengandung satu atau lebih pusat logam yang terikat pada ligan, dimana ligan dapat berupa atom, ion, atau molekul yang mentransfer elektron ke logam (Hermawati et al., 2019). Pembentukan kompleks melibatkan interaksi orbital molekul yang menghasilkan geometri spesifik seperti oktahedral, tetrahedral, atau planar persegi, dengan sifat elektronik dan geometrik kompleks logam transisi sebagian besar ditentukan oleh pusat logam dan ligan organik tempat logam terkoordinasi (Jacob et al., 2025). Kestabilan dan reaktivitas senyawa kompleks sangat bergantung pada konfigurasi elektronik ion pusat, kekuatan medan ligan, dan

efek sterik yang menentukan sifat fisikokimia kompleks yang terbentuk (Dasna et al., 2022).

Zn(II) memiliki karakteristik unik dengan konfigurasi elektronik  $d^{10}$  dimana orbital 3d terisi penuh, menjadikannya diamagnetik dan stabil terhadap reaksi redoks (Hermawati et al., 2016). Konfigurasi  $d^{10}$  yang terisi penuh menyebabkan tidak adanya energi stabilisasi medan ligan yang dominan, sehingga geometri kompleks Zn(II) dapat bervariasi dari tetrahedral hingga oktahedral bergantung pada sifat ligan yang terikat (Dasna et al., 2022). Fleksibilitas geometri koordinasi ini memungkinkan Zn(II) untuk beradaptasi dengan berbagai jenis ligan, baik ligan monodentat maupun polidentat. Sifat non-redoks Zn(II) memberikan kestabilan termodinamik tinggi dan meminimalkan reaksi samping yang tidak diinginkan selama proses sintesis dan karakterisasi (Lely et al., 2019).



Pemilihan Zn(II) sebagai ion pusat dalam sintesis kompleks didasarkan pada beberapa pertimbangan strategis. Pertama, kelimpahan dan aksesibilitas zinc yang relatif tinggi menjadikannya pilihan yang ekonomis dibandingkan logam mulia atau logam tanah jarang (Handayani et al., 2021). Kedua, sifat non-toksik Zn(II) membuatnya lebih aman untuk berbagai aplikasi penelitian (Sumarsih et al., 2019). Ketiga, kestabilan kimia kompleks Zn(II) yang tinggi memungkinkan karakterisasi struktur yang akurat melalui berbagai teknik spektroskopi seperti FTIR, UV-Vis, dan analisis termal (Hermawati et al., 2016). Keempat, fleksibilitas geometri koordinasi Zn(II) memfasilitasi pembentukan struktur supramolekular yang kompleks termasuk Metal Organic Frameworks (MOFs) dan polimer koordinasi (Mahreni et al., 2020). Kelima, kompleks Zn(II) dapat disintesis dengan berbagai jenis ligan organik seperti Schiff base, flavonoid, dan ligan polidentat yang menghasilkan struktur dengan geometri dan sifat yang beragam (Lely et al., 2019).

Penelitian Zn(II) di Indonesia beberapa tahun kebelakang menunjukkan perkembangan yang signifikan dengan berbagai metode sintesis dan karakterisasi. Penelitian Hermawati et al. (2016) berhasil mensintesis kompleks Zn(II)-8-hidroksikuinolin dengan rendemen tertinggi 73,07% menggunakan pelarut asetonitril. Sintesis kompleks Zn(II) dengan ligan Schiff base dari sulfametoksazol dan vanillin telah dilakukan dengan karakterisasi lengkap menggunakan spektroskopi FTIR dan UV-Vis. Setyawati et al. (2017) mensintesis kompleks Zn(II)-EDTA yang menunjukkan kestabilan tinggi dalam larutan. Sumarsih et al. (2019) melaporkan sintesis kompleks Zn(II)-katekin dengan stoikiometri 1:1 yang dikonfirmasi melalui analisis spektroskopi. Perkembangan ini menunjukkan tren penelitian kompleks Zn(II) yang semakin beragam dari segi jenis ligan, metode sintesis, dan teknik karakterisasi yang digunakan.

Review artikel ini bertujuan untuk menganalisis berbagai jurnal tentang sintesis kompleks Zn(II) berskala nasional dan internasional dengan meninjau aspek metode sintesis, jenis ligan, dan hasil karakterisasinya. Melalui studi komparatif ini, efektivitas setiap metode serta sifat senyawa yang dihasilkan dapat dipetakan secara mendalam. Hasil tinjauan ini diharapkan mampu merangkum tren penelitian serta potensi pengembangan lebih lanjut bagi senyawa kompleks Zn(II) ke depannya.

## Bahan dan Metode

### Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan literature review atau studi pustaka. Pendekatan ini dilakukan dengan mengkaji dan menganalisis artikel ilmiah yang membahas sintesis dan karakterisasi senyawa kompleks Zn(II) menggunakan ligan organik. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari jurnal nasional dan internasional yang relevan. Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah seperti Google Scholar dan ScienceDirect dengan kata kunci yang berkaitan dengan senyawa kompleks Zn(II), sintesis senyawa koordinasi, dan karakterisasi senyawa kompleks. Metode literature review dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai metode

sintesis, karakteristik, serta kestabilan senyawa kompleks Zn(II) berdasarkan hasil penelitian terdahulu (Hermawati et al., 2016; Rahmalia et al., 2023).

Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan data sekunder berupa artikel jurnal yang membahas sintesis dan karakterisasi senyawa kompleks Zn(II) dengan berbagai jenis ligan organik. Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur pada Google Scholar dan ScienceDirect. Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kesesuaian judul, abstrak, dan isi artikel dengan topik penelitian, khususnya yang melaporkan metode sintesis, kondisi reaksi, serta teknik karakterisasi seperti UV-Vis, FTIR, dan AAS (Hermawati et al., 2016; Indriyanti et al., 2022).

Artikel jurnal yang terpilih selanjutnya dikelompokkan menjadi jurnal nasional dan jurnal internasional, kemudian diklasifikasikan berdasarkan kategori akreditasi jurnal nasional dan reputasi jurnal internasional. Setelah proses pengelompokan, dilakukan pengkajian dan analisis terhadap setiap jurnal dengan menelaah metode sintesis, jenis ligan yang digunakan, serta hasil karakterisasi senyawa kompleks Zn(II) yang diperoleh. Hasil analisis dari seluruh jurnal yang direview kemudian disintesis untuk mengetahui persamaan, perbedaan, dan kecenderungan metode sintesis serta sifat senyawa kompleks Zn(II). Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil kajian literatur mengenai efektivitas metode sintesis dan potensi pengembangan senyawa kompleks Zn(II) (Rahmalia et al., 2023).

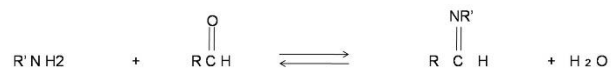
## Hasil dan Pembahasan

### Jenis Ligan pada Sintesis Kompleks Zn(II)

Pemilihan ligan merupakan tahap awal yang paling krusial karena karakteristik atom donornya akan menentukan stabilitas dan sifat fisikokimia dari logam pusat Zn(II). Berdasarkan analisis terhadap berbagai literatur, ligan organik lebih dominan dibandingkan ligan anorganik karena kemampuannya menyediakan variasi atom donor seperti Nitrogen (N) dan Oksigen (O). Ligan organik seperti Isoniazid dan Pirazinamida menggunakan pasangan elektron bebas pada nitrogen heterosiklik untuk membentuk ikatan kovalen koordinasi yang stabil (Muratov et al., 2024; Adiba et al., 2024). Sementara itu, ligan anorganik seperti ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) sering kali bertindak sebagai ligan pembantu atau jembatan untuk menyeimbangkan muatan dalam kisi kristal dan struktur molekular, namun tetap dapat berkoordinasi secara langsung dengan logam pusat (Indriyanti et al., 2022).

Penelitian terhadap ligan organik ini semakin berkembang dengan pemanfaatan ligan Schiff base yang dikenal memiliki stabilitas termal tinggi dan kemudahan membentuk struktur kelat melalui kondensasi amina primer dengan senyawa karbonil. Ligan Schiff base yang disintesis dari sulfametoksazol dan vanilin menunjukkan pembentukan gugus azometin ( $-\text{CH}=\text{N}$ ) yang sangat efektif dalam mengikat ion Zn(II) melalui koordinasi atom nitrogen (Lely et al., 2019). Keberadaan gugus fungsional tersebut memberikan situs aktif yang kuat, sehingga kompleks yang dihasilkan sering kali memiliki aktivitas biologis yang lebih

baik daripada ligan aslinya dalam menghambat bakteri patogen (Lely et al., 2019; Jain & Joshi, 2021).



Amin Primer Senyawa Karbonil Senyawa Schiff base Air (Aldehid)

**Gambar 1.** Reaksi Pembentukan Senyawa Schiff base

Pembentukan ligan Schiff base pada gambar 1 melibatkan reaksi kondensasi antara gugus amina dari sulfametoksazol dengan gugus karbonil dari vanilin. Terbentuknya ikatan azometin ( $C=N$ ) ini sangat krusial karena atom Nitrogen pada ikatan tersebut memiliki pasangan elektron bebas yang akan bertindak sebagai atom donor utama untuk mengikat ion logam Zn(II). Perubahan kerapatan elektron pada ikatan  $C=N$  setelah mengikat Zn(II) menjadi kunci utama peningkatan aktivitas antibakteri (Lely et al., 2019).

Stabilitas ikatan koordinasi tersebut tidak hanya ditemukan pada Schiff base, tetapi juga dapat diperkuat melalui efek sepi (chelate effect) pada ligan polidentat. Ligan heksadentat, seperti EDTA, memiliki kemampuan untuk memberikan enam titik ikatan sekaligus untuk "membungkus" ion Zn(II), yang menghasilkan senyawa yang sangat stabil dalam berbagai kondisi lingkungan (Setyawati et al., 2017). Kemampuan serupa juga ditunjukkan oleh gugus karboksil dan fenolik pada struktur polimer alami seperti asam humat, yang dapat membentuk kompleks makromolekul saat berinteraksi dengan logam (Muthia et al., 2022). Kemampuan ligan untuk membungkus logam ternyata berbanding lurus dengan peningkatan bioaktivitas dan stabilitas zat organik yang diikatnya. Hal ini terbukti pada penggunaan ligan katekin dan astaxanthin, di mana koordinasi dengan Zn(II) melalui gugus hidroksil mampu membuat struktur yang menghambat aktivitas enzim lipase secara efektif (Putri et al., 2019). Di sisi lain, pembentukan kompleks dengan astaxanthin memberikan perlindungan struktural terhadap degradasi yang disebabkan oleh paparan cahaya, yang secara signifikan meningkatkan fotostabilitas pigmen tersebut (Rahmalia et al., 2023).

Ligan polidentat seperti asam humat dan EDTA memberikan stabilitas termodinamika yang lebih baik melalui efek sepi (chelate effect). Asam humat, sebagai polimer organik alami dengan banyak gugus fungsional seperti karboksil dan fenolik, menunjukkan interaksi yang sangat bergantung pada pH untuk mencapai stabilitas maksimum. Di sisi lain, ligan EDTA yang bersifat heksadentat memiliki kemampuan mengikat ion Zn(II) dengan sangat kuat, membentuk struktur yang larut dalam air dan sangat stabil bahkan dalam kondisi lingkungan industri yang ekstrem, seperti agen antialga pada sistem air pendingin (Setyawati et al., 2017). Pendekatan ini seringkali menghasilkan struktur yang lebih stabil daripada pendekatan dengan kompleks ligan tunggal karena efek sinergis antara ligan utama dan ligan pembantu dalam memenuhi ruang koordinasi logam (Indriyanti et al., 2022). Stabilitas kompleks Zn(II) dipengaruhi pada jenis atom donor dan struktur ruang ligan. Ligan polidentat seperti EDTA memberikan kestabilan yang sangat baik melalui

pembentukan banyak cincin kelat yang membungkus ion pusat (Setyawati et al., 2017).

Upaya mencapai sifat fungsional yang lebih spesifik, berdasarkan analisis yang dilakukan sering kali ditemukan beberapa jenis ligan digabungkan atau yang dikenal sebagai ligan campuran (*mixed ligand*). Dengan menggabungkan ligan utama pyruvic acid salicylhydrazone dengan ligan pendukung seperti piridina, lingkungan koordinasi yang jenuh dapat terbentuk dan berat molekul kompleks meningkat (Jain & Joshi, 2021). Strategi ini terbukti efektif untuk mengarahkan pembentukan kristal tunggal yang lebih teratur serta meningkatkan sifat lipofilisitas senyawa agar lebih mudah menembus membran sel target (Jain & Joshi, 2021; Hermawati et al., 2016). Sebagai konsekuensi dari pengaturan ligan tersebut, hambatan sterik molekuler seperti pada 1,4-bis(difenilfosfino)butana (dppb) dapat memaksa logam untuk membentuk struktur dimer daripada monomer. Ligan 1,4-bis(difenilfosfino)butana (dppb) dapat berfungsi sebagai ligan jembatan yang menghubungkan dua pusat logam. Ini membuat struktur dimer khusus untuk menyeimbangkan hambatan sterik gugus fenil yang besar pada ligan fosfin (Indriyanti et al., 2022). Sehingga, karakteristik struktural ligan secara langsung mendesain arsitektur molekuler akhir, mulai dari bentuk unit tunggal hingga struktur polimerik yang kompleks (Indriyanti et al., 2022; Adiba et al., 2024).

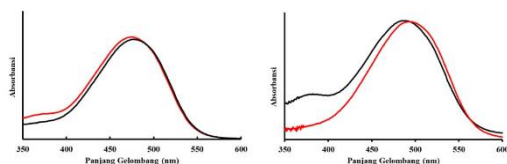
#### Metode Sintesis Kompleks Zn(II)

Struktur kompleks yang telah direncanakan melalui pemilihan ligan tersebut memerlukan metode sintesis yang tepat, di mana metode larutan (*solution method*) menjadi jalur utama yang digunakan dalam kebanyakan literatur. Metode larutan (*solution method*) merupakan teknik yang paling dominan digunakan dalam sintesis kompleks Zn(II), baik menggunakan pelarut air (*aqueous*) maupun pelarut organik (*non-aqueous*) karena efektivitasnya dalam menghasilkan produk murni. Pelarut air sering digunakan pada sintesis dengan ligan asam humat atau EDTA karena kelarutannya yang baik (Muthia et al., 2022; Hermawati et al., 2016). Namun, untuk ligan organik yang bersifat hidrofobik seperti astaxanthin atau dppb, penggunaan pelarut organik seperti aseton, metanol, atau kloroform menjadi mutlak diperlukan guna memastikan interaksi antar molekul berjalan optimal (Rahmalia et al., 2023). Pemilihan pelarut sangat bergantung pada polaritas ligan, di mana pelarut organik seperti asetonitril terbukti memberikan hasil kristalisasi yang lebih baik untuk kompleks Zn(II)-8-hidroksikuinolin dibandingkan pelarut alkohol (Hermawati et al., 2016). Proses ini biasanya melibatkan teknik refluks atau pengadukan intensif untuk memastikan energi aktivasi reaksi tercapai sehingga ikatan logam-ligan dapat terbentuk secara sempurna (Jain & Joshi, 2021; Adiba et al., 2024).

Berdasarkan penggunaan pelarut tersebut, pendekatan sintesis dapat dibedakan menjadi metode satu tahap (*one-pot*) dan metode bertahap, tergantung pada stabilitas dan kompleksitas ligan yang digunakan. Metode satu tahap sering diterapkan pada kompleks dengan ligan yang sudah stabil secara komersial seperti pirazinamida, di mana logam dan ligan dicampur langsung dan direfluks untuk menghasilkan endapan kompleks (Adiba et al.,

2024). Sebaliknya, metode bertahap biasanya digunakan dalam sintesis kompleks Schiff base, di mana ligan azometin harus disintesis dan dimurnikan terlebih dahulu sebelum direaksikan dengan garam logam (Lely et al., 2019; Jain & Joshi, 2021).

Proses sintesis menyebabkan kondisi pH larutan memegang peranan penting untuk mengontrol derajat deprotonasi ligan dan mencegah pengendapan logam sebagai hidroksida. Optimasi kondisi pH dan suhu reaksi memegang peranan penting dalam menentukan keberhasilan pembentukan ikatan koordinasi dan penting untuk mencegah pembentukan produk samping atau dekomposisi ligan. Pada sintesis Zn-Isoniazid dan Zn-Asam Humat, pengendalian pH pada rentang tertentu sangat diperlukan untuk memastikan deprotonasi ligan terjadi secara optimal, sehingga atom donor dapat berikatan dengan logam tanpa menyebabkan pengendapan  $Zn(OH)_2$  (Muratov et al., 2024; Muthia et al., 2022). Pada sintesis kompleks Zn-Isoniazid, pH lingkungan harus dijaga pada kondisi asam lemah (pH 5) untuk mencegah pengendapan logam sebagai hidroksida sebelum sempat berkoordinasi dengan ligan (Muratov et al., 2024). Suhu dan waktu reaksi juga sangat mempengaruhi kinetika pembentukan kompleks serta kualitas kristal yang dihasilkan. Sebagai contoh, sintesis Zn-astaxanthin memerlukan suhu operasional  $60^\circ C$  untuk mencapai energi aktivasi koordinasi yang diinginkan tanpa merusak struktur sensitif dari ligan karotenoid tersebut (Rahmalia et al., 2023). Penggunaan suhu tinggi yang terkontrol melalui alat refluks terbukti membantu mempercepat nukleasi kristal sehingga diperoleh fasa padat yang lebih murni (Adiba et al., 2024; Indriyanti et al., 2022).



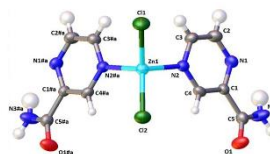
**Gambar 2.** Spektra absorpsi UV-Vis astaxanthin (merah) dan kompleks Zn(II)-astaxanthin (hitam) dalam aseton (kiri) dan dalam dimetil sulfoksida (kanan)

Gambar 2 oleh Rahmalia et al. (2023), hasil analisis UV-Vis memperlihatkan adanya pergeseran panjang gelombang maksimum astaxanthin dari 475 nm menjadi 481 nm setelah dikomplekskan dengan Zn(II). Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa sintesis pada suhu  $60^\circ C$  menghasilkan intensitas absorbansi yang lebih optimal dibandingkan suhu  $37^\circ C$ , yang mengindikasikan bahwa energi panas membantu efektivitas koordinasi antara logam dengan ligan astaxanthin. Selain suhu, durasi refluks juga menentukan kesempurnaan pembentukan kristal, waktu yang terlalu singkat dapat menyebabkan reaksi tidak tuntas, sedangkan waktu yang terlalu lama berisiko mendekomposisi ligan organik yang sensitif seperti astaxanthin. Kestabilan reaksi pada suhu tersebut juga sangat dipengaruhi oleh rasio molar antara logam dan ligan (M:L). Rasio 1:1 umumnya digunakan untuk ligan polidentat kuat seperti EDTA, sedangkan rasio 1:2 lebih lazim untuk ligan bidentat guna memenuhi angka koordinasi logam pusat secara ideal (Setyawati et al., 2017; Muratov et al., 2024). Ketepatan

rasio ini sangat penting untuk mencegah adanya reaktan sisa yang dapat mengotori hasil akhir senyawa kompleks (Putri et al., 2019). Sebagai alternatif dari metode kimia konvensional tersebut, teknik elektrolisis mulai dikembangkan sebagai jalur sintesis yang lebih bersih. Melalui penggunaan anoda logam seng dalam media natrium sitrat, ion seng dilepaskan secara bertahap untuk membentuk prekursor yang sangat murni (Ulum et al., 2018). Teknik ini menawarkan kontrol lebih baik terhadap ukuran partikel kompleks yang dihasilkan dibandingkan metode larutan biasa (Ulum et al., 2018).

### Struktur dan Geometri Kompleks Zn(II)

Senyawa kompleks telah berhasil disintesis melalui berbagai metode tersebut, tahapan krusial berikutnya adalah penentuan struktur dan geometri koordinasi logam pusat. Ion seng dengan konfigurasi  $d^{10}$  memiliki fleksibilitas koordinasi yang tinggi, di mana geometri tetrahedral merupakan struktur yang paling sering ditemukan pada ligan bidentat seperti  $[Zn(pza)_2(Cl)_2]$  (Adiba et al., 2024). Dalam struktur ini, empat atom donor menempati posisi yang saling berjauhan untuk meminimalkan tolakan elektrostatis (Adiba et al., 2024; Hermawati et al., 2016). Namun, apabila ligan yang digunakan bersifat polidentat, geometri koordinasi Zn(II) dapat meluas menjadi oktahedral. Hal ini teramati pada kompleks Zn(II)-EDTA dan kompleks ligan campuran, di mana enam situs koordinasi terisi penuh oleh atom donor atau molekul pelarut (Setyawati et al., 2017; Jain & Joshi, 2021). Perubahan geometri dari tetrahedral ke oktahedral ini biasanya diikuti dengan peningkatan stabilitas termal senyawa (Jain & Joshi, 2021).



**Gambar 3.** Hasil analisis Single Crystal X-Ray Diffraction (SC-XRD)

Penentuan struktur ini dikonfirmasi melalui analisis kristalografi sinar-X, pada gambar 3 oleh (Adiba et al., 2024). Gambar tersebut memperlihatkan atom pusat Zn(II) yang berkoordinasi dengan dua ligan pirazinamida melalui atom nitrogen heterosiklik (N) dan dua ion klorida (Cl). Formasi ini menghasilkan geometri tetrahedral terdistorsi, yang merupakan ciri khas fleksibilitas koordinasi logam seng dalam memenuhi orbital hibridanya. Geometri ini dapat berkembang menjadi struktur yang lebih unik seperti pembentukan kompleks dimer. Ligan jembatan seperti dppb memaksa dua pusat logam Zn(II) untuk saling terhubung melalui ligan tersebut karena keterbatasan ruang untuk koordinasi kelat pada satu pusat logam saja (Indriyanti et al., 2022). Hal ini menegaskan bahwa arsitektur molekul sangat dipengaruhi oleh panjang rantai karbon dan jenis atom donor ligan yang digunakan (Indriyanti et al., 2022; Muthia et al., 2022).

Gambaran komprehensif mengenai keterkaitan antara jenis ligan, metode yang diterapkan, dan hasil desain struktural dapat

dilihat dari rangkuman data berbagai literatur yang disajikan pada tabel 1 berikut ini:

**Tabel 1.** Jenis ligan, metode, dan hasil desain struktural

Nama Ligan	Jenis Atom Donor	Metode Sintesis	Geometri/Struktur	Sumber	
Pirazi namida	N, N (Bidentat)	Larutan	1:2	Tetrahedral	Adiba et al., 2024
Isoniazid	N, O (Bidentat)	Larutan (pH 5)	1:2	Tetrahedral	Muratov et al., 2024
Astaxanthin	O (Polidentat)	Refluks	-	Kompleks Koordinasi	Rahmalia et al., 2023
EDTA	N, O (Heksadentat)	Larutan	1:1	Oktahedral	Setyawati et al., 2017
Katekin	O, O (Bidentat)	Larutan	1:1	Koordinasi Zn-O	Putri et al., 2019
Schiff Base (SMX-Van)	N, O (Bidentat)	Refluks	-	Kelat Azometin	Lely et al., 2019
Pyruvic Acid	O, N, O (Trisulata)	Refluks	1:1	Oktahedral	Jain & Joshi, 2021
8-HQ	N, O (Bidentat)	Larutan (MeCN)	1:2	Bis-Kompleks	Herwati et al., 2016
dppb	P, P (Jembatan)	Larutan	1:1	Dimer	Indriyanti et al., 2022
Asam Humat	O (Polimer)	Larutan (pH 7)	Variasi	Makromolekul	Muthia et al., 2022
Natrium Sitrat	O (Karboksilat)	Elektrolisis	-	Prekursor/Nanopartikel	Ulum et al., 2018

Berdasarkan data pada tabel 1, terlihat adanya korelasi yang jelas antara densitas atom donor pada ligan dengan geometri akhir yang terbentuk. Ligan organik bidentat seperti pirazinamida dan isoniazid cenderung membentuk geometri tetrahedral melalui rasio molar 1:2 untuk mencapai kestabilan koordinasi empat (Adiba et al., 2024; Muratov et al., 2024). Sebaliknya, ligan polidentat dengan jumlah atom donor yang lebih banyak, seperti EDTA dan pyruvic acid, secara konsisten menghasilkan geometri oktahedral yang lebih jenuh (Setyawati et al., 2017; Jain & Joshi, 2021). Dari sisi metodologi, penggunaan

metode larutan dengan kontrol suhu tinggi (60-75°C) dan optimasi pH terbukti paling efektif dalam memfasilitasi pembentukan ikatan koordinasi, terutama pada ligan yang memiliki hambatan sterik atau sensitivitas termal seperti astaxanthin (Rahmalia et al., 2023). Integrasi data ini menunjukkan bahwa keberhasilan sintesis kompleks Zn(II) bukan hanya ditentukan oleh satu faktor, melainkan hasil sinergi antara pemilihan jenis atom donor ligan, ketepatan variabel suhu/pH, serta stoikiometri reaksi yang diterapkan. Tabel 1 merangkum keragaman ligan dan metodologi yang digunakan dalam pembentukan kompleks Zn(II). Terlihat bahwa ligan dengan atom donor Nitrogen (N) dominan dalam aplikasi antibakteri, sementara ligan kaya Oksigen (O) lebih banyak digunakan untuk aplikasi stabilitas pangan dan lingkungan. Metode larutan tetap menjadi standar utama, namun teknik elektrolisis memberikan alternatif prekursor yang murni. Koordinasi paling kompleks dan stabil ditemukan pada ligan polidentat (EDTA dan Pyruvic Acid) yang menghasilkan geometri oktahedral

Konfirmasi fisik terhadap seluruh model struktur dilakukan melalui analisis spektroskopi FT-IR untuk membuktikan adanya ikatan logam-ligan. Munculnya pita serapan baru pada daerah bilangan gelombang rendah (400-520 $\text{cm}^{-1}$ ) memberikan bukti nyata adanya ikatan Zn-N dan Zn-O (Setyawati et al., 2017; Putri et al., 2019). Pergeseran puncak pada gugus fungsi ligan asli menjadi petunjuk tambahan mengenai atom mana yang bertindak sebagai donor elektron (Lely et al., 2019; Jain & Joshi, 2021). Melengkapi data spektroskopi tersebut, analisis difraksi sinar-X (XRD) menjadi bukti final untuk menentukan kristalinitas dan parameter kisi senyawa. Pola difraksi yang tajam pada kompleks pirazinamida mengonfirmasi terbentuknya fasa kristalin murni yang teratur (Adiba et al., 2024). Sementara itu, bagi kompleks yang berbentuk amorf, data XRD serbuk tetap digunakan untuk menunjukkan perbedaan fasa yang signifikan dibandingkan ligan murninya (Putri et al., 2019; Indriyanti et al., 2022). Seluruh rangkaian data karakterisasi struktur ini pada akhirnya memberikan pemahaman mendalam mengenai hubungan antara geometri molekul dengan efektivitas aplikasinya. Struktur geometri yang stabil dan jenuh akan mempermudah senyawa kompleks dalam berinteraksi dengan target biologis, baik sebagai antibakteri maupun inhibitor enzim (Adiba et al., 2024; Lely et al., 2019). Dengan demikian, penguasaan atas desain struktur menjadi kunci utama dalam pengembangan material fungsional berbasis seng di masa depan (Jain & Joshi, 2021; Muratov et al., 2024).

#### Teknik Karakterisasi

Pembentukan kompleks Zn(II) umumnya dikonfirmasi melalui teknik spektroskopi dan analisis fisikokimia. Spektroskopi inframerah (FTIR) merupakan metode karakterisasi yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi ikatan antara ion Zn(II) dan ligan. Terjadinya pergeseran bilangan gelombang pada gugus fungsi donor seperti C=O, C=N (azometin), O-H, dan C-O setelah pengompleksan menunjukkan adanya koordinasi ligan dengan ion Zn(II). Selain itu, kemunculan pita serapan baru pada daerah bilangan

gelombang rendah sekitar 400–600 cm<sup>-1</sup> diinterpretasikan sebagai vibrasi ikatan Zn–O atau Zn–N yang menegaskan terbentuknya ikatan koordinasi logam–ligan (Lely et al., 2019; Setyawati et al., 2017; Sumarsih et al., 2019). Spektroskopi UV-Vis digunakan untuk mengamati perubahan sifat elektronik kompleks Zn(II) dibandingkan ligan bebas. Beberapa artikel menunjukkan hasil adanya pergeseran panjang gelombang maksimum (bathokromik) setelah pembentukan kompleks, yang dikaitkan dengan perubahan lingkungan elektronik ligan akibat

Konsentrasi (ppm)	Diameter Hambat (mm)			Diameter Hambat Rata-Rata (mm) ± SD
	1	2	3	
2500	7,6	7,6	7,9	7,7 ± 0,17
5000	8,8	8,7	8,3	8,6 ± 0,26
10000	12,9	13	12,5	12,8 ± 0,26
15000	14,8	15,4	15,3	15,1 ± 0,33
Kontrol +	10,9	11,1	10,7	10,9 ± 0,2
Kontrol -	-	-	-	-

koordinasi dengan Zn(II). Misalnya, kompleks Zn(II)-EDTA dan Zn(II)-katekin menunjukkan nilai λ<sub>max</sub> yang lebih besar dibandingkan senyawa penyusunnya, mengindikasikan terbentuknya struktur kompleks yang lebih stabil (Setyawati et al., 2017; Sumarsih et al., 2019).

Selain teknik spektroskopi, beberapa penelitian juga melibatkan analisis elemental untuk memastikan rasio stoikiometri logam dan ligan, serta pengukuran konduktivitas molar untuk menentukan sifat elektrolit kompleks. Nilai konduktivitas yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar kompleks Zn(II) bersifat non-elektrolit. Pada beberapa artikel, analisis termal (TGA/DTA) digunakan untuk mengevaluasi kestabilan termal kompleks dan keberadaan molekul air atau pelarut dalam struktur kristalnya, sedangkan studi kristalografi masih relatif terbatas dan belum menjadi metode utama dalam sebagian besar penelitian yang direview.

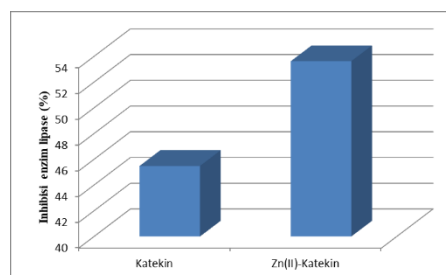
**Sifat dan Aplikasi Kompleks Zn(II)**

Pengompleksan ligan dengan ion Zn(II) secara umum meningkatkan aktivitas biologis senyawa, terutama sebagai antibakteri dan antijamur. Kompleks Zn(II) berbasis Schiff base, sulfametoksazol, dan senyawa flavonoid memiliki aktivitas antimikroba yang lebih tinggi dibandingkan ligan bebasnya. Peningkatan ini dikaitkan dengan teori khelasi, di mana pembentukan kompleks Zn(II) meningkatkan lipofilisitas senyawa sehingga memudahkan penetrasi ke membran sel mikroorganisme (Lely et al., 2019; Sumarsih et al., 2019). Selain aktivitas biologis, beberapa artikel juga menunjukkan hasil potensi kompleks Zn(II) sebagai katalis dan inhibitor enzim. Kompleks Zn(II)-katekin, misalnya, menunjukkan peningkatan kemampuan sebagai inhibitor enzim lipase dibandingkan katekin bebas, yang ditunjukkan oleh nilai persentase inhibisi yang lebih tinggi serta mekanisme inhibisi campuran (Sumarsih et al., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa ion Zn(II) berperan penting dalam meningkatkan interaksi kompleks dengan sisi aktif enzim. Pengaruh pengompleksan Zn(II) terhadap aktivitas biologis senyawa ditunjukkan secara kuantitatif melalui grafik hasil pengujian. Pada penelitian Lely et al. (2019), aktivitas antibakteri ligan dan kompleks Zn(II) dibandingkan untuk melihat peningkatan efektivitas setelah pembentukan kompleks.

**Gambar 4.** Hasil Pengukuran Diameter Hambat Sulfametoksazol terhadap Bakteri Salmonella thypi ATCC 19943

**Gambar 5.** Hasil pengukuran diameter hambat kompleks sulfametoksazol–Zn(II) terhadap Salmonella thypi ATCC 19943

Perbandingan antara gambar 4 dan gambar 5 menunjukkan bahwa kompleks sulfametoksazol–Zn(II) menghasilkan diameter hambat yang lebih besar pada seluruh variasi konsentrasi dibandingkan sulfametoksazol tanpa pengompleksan. Pada konsentrasi 10.000 ppm, misalnya, diameter hambat kompleks Zn(II) mencapai sekitar 12,8 mm, sedangkan ligan bebas hanya sekitar 11,1 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pengompleksan dengan ion Zn(II) meningkatkan aktivitas antibakteri senyawa. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa keberadaan ion Zn(II) memperkuat efektivitas sulfametoksazol dalam menghambat pertumbuhan Salmonella thypi. Selain aktivitas antibakteri, beberapa penelitian lain juga mengkaji potensi kompleks Zn(II) dalam sistem biologis yang berbeda. Penelitian Sumarsih et al. (2019), misalnya, menilai pengaruh kompleks Zn(II) terhadap aktivitas enzim, khususnya sebagai inhibitor enzim lipase. Hasil pengujian tersebut disajikan dalam bentuk grafik persentase inhibisi enzim yang menunjukkan perbedaan jelas antara ligan bebas dan kompleks Zn(II).



**Gambar 6.** Grafik pengaruh pengompleksan ligan katekin dengan ion logam Zn<sup>2+</sup> terhadap % inhibisi aktivitas enzim lipase

Grafik menunjukkan bahwa kompleks Zn(II)–katekin memiliki persentase inhibisi enzim lipase yang lebih tinggi dibandingkan katekin bebas pada seluruh konsentrasi yang diuji. Peningkatan inhibisi terlihat jelas seiring bertambahnya konsentrasi senyawa, dengan nilai tertinggi sebesar 53,62% pada konsentrasi 50 µg/mL untuk kompleks Zn(II)–katekin. Nilai ini lebih besar dibandingkan katekin tanpa pengompleksan, yang menunjukkan bahwa keberadaan ion Zn(II) berpengaruh terhadap aktivitas penghambatan enzim. Pembentukan kompleks dengan Zn(II) diduga memperkuat interaksi antara senyawa dan sisi aktif enzim lipase. Interaksi tersebut memungkinkan ligan berikatan lebih efektif dengan enzim sehingga aktivitas inhibisi meningkat. Hasil ini menunjukkan bahwa pengompleksan katekin dengan ion Zn(II) dapat meningkatkan potensinya sebagai inhibitor enzim.

Perbandingan antara grafik aktivitas antibakteri pada penelitian Lely et al. (2019) dan grafik inhibisi enzim lipase pada penelitian Sumarsih et al. (2019) menunjukkan pola peningkatan

aktivitas biologis setelah ligan dikomplekskan dengan ion Zn(II). Kompleks Zn(II) pada kedua penelitian tersebut memberikan respons biologis yang lebih tinggi dibandingkan ligan bebasnya, meskipun parameter uji yang digunakan berbeda. Penelitian Lely et al. (2019) menitikberatkan pada kemampuan kompleks Zn(II) dalam menghambat pertumbuhan bakteri, sedangkan penelitian Sumarsih et al. (2019) menilai pengaruhnya terhadap aktivitas enzim lipase. Perbedaan jenis ligan dan sistem biologis yang diuji menyebabkan perbedaan aplikasi yang dihasilkan. Namun, peningkatan aktivitas pada kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa pembentukan ikatan koordinasi antara ligan dan ion Zn(II) berperan penting dalam meningkatkan efektivitas biologis senyawa. Temuan ini memperkuat bahwa pengompleksan Zn(II) merupakan pendekatan yang potensial dalam pengembangan senyawa dengan aktivitas biologis yang lebih baik.

Bidang material dan lingkungan, kompleks Zn(II) juga menunjukkan aplikasi yang signifikan. Kompleks Zn(II)-EDTA efektif sebagai agen antialga pada sistem cooling water industri dengan persentase penghambatan yang tinggi terhadap alga hijau dan alga coklat, bahkan melebihi bahan komersial pembanding (Setyawati et al., 2017). Temuan ini memperlihatkan potensi kompleks Zn(II) sebagai material fungsional yang aplikatif di bidang industri dan lingkungan. Jika dibandingkan antar jurnal, dapat disimpulkan bahwa perbedaan jenis ligan sangat memengaruhi sifat dan aplikasi kompleks Zn(II). Kompleks dengan ligan bioaktif cenderung diaplikasikan di bidang biologi dan farmasi, sedangkan kompleks dengan ligan pengkhatat kuat lebih banyak dimanfaatkan dalam bidang material dan lingkungan. Meskipun metode sintesis dan pengujian bervariasi, seluruh artikel menunjukkan bahwa pembentukan kompleks Zn(II) memberikan peningkatan sifat fungsional dibandingkan ligan bebasnya.

#### Keterbatasan Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan potensi yang menjanjikan, namun terdapat beberapa keterbatasan yang ditemukan dalam artikel-artikel yang direview. Perbedaan metode uji dan teknik karakterisasi menjadi kendala utama dalam membandingkan hasil antar penelitian secara langsung. Variasi kondisi eksperimen, jenis mikroorganisme uji, serta parameter pengujian menyebabkan data yang dihasilkan belum sepenuhnya seragam. Selain itu, sebagian besar artikel masih belum membahas mekanisme kerja dan aspek toksisitas secara mendalam. Uji aktivitas biologis umumnya dilakukan secara in vitro tanpa kajian lanjutan mengenai interaksi kompleks Zn(II) dengan sistem biologis secara menyeluruh. Hal ini menjadi keterbatasan penting, terutama untuk pengembangan lebih lanjut di bidang farmasi dan biomedis. Keterbatasan lainnya adalah minimnya data kuantitatif pendukung, seperti konstanta kestabilan kompleks, analisis struktur kristal resolusi tinggi, serta studi kinetika yang komprehensif. Sebagian penelitian hanya mengandalkan satu atau dua teknik karakterisasi utama, sehingga informasi struktur kompleks masih bersifat interpretatif. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan pendekatan

karakterisasi yang lebih lengkap dan terstandar sangat diperlukan untuk memperkuat kesimpulan yang diperoleh.

## Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan terhadap berbagai literatur ilmiah, baik berskala nasional maupun internasional, telah memberikan pemahaman mendalam mengenai efektivitas berbagai metode sintesis dan karakteristik senyawa kompleks Zn(II) yang dihasilkan. Berdasarkan hasil kajian, metode larutan (*solution method*) baik menggunakan pelarut air maupun organik tetap menjadi teknik yang paling dominan dan efektif karena kemampuannya menghasilkan produk murni melalui optimasi kondisi pH, suhu reaksi (seperti 60°C), dan rasio molar logam-ligan yang tepat. Pemilihan ligan organik dengan atom donor Nitrogen (N) dan Oksigen (O), seperti Schiff base dan ligan polidentat (EDTA), terbukti krusial dalam menentukan stabilitas serta geometri koordinasi Zn(II) yang fleksibel, mulai dari bentuk tetrahedral hingga oktahedral.

## Daftar Pustaka

- Adiba, N. A., Purwonugroho, D., Srihardyastutie, A., & Prananto, Y. P. (2024). Crystallization of [Zn(Pyrazinamide)<sub>2</sub>(Cl)<sub>2</sub>] Complex and In Vitro Antibacterial Activity of the Complex Against E. coli and S. aureus. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 27(9), 436-443.
- Dasna, I. W., Mariyam, D., Farida, N., Wijaya, H. (2022). Studi Karakterisasi Senyawa Kompleks dari Zn(II) Klorida. *Jurnal Riset Kimia*, 15(1), 58-67.
- Handayani, N. C., Shafira, P. N., & Fadhilah, S. G. (2021). Potensi Pengembangan Agen Antibakteri dari Senyawa Kompleks Logam Transisi di Indonesia. *The Indonesian Green Technology Journal*. 1(10), 9-20.
- Hermawati, E. S., Suhartana, & Taslimah. (2016). Sintesis dan Karakterisasi Senyawa Kompleks Zn(II)-8-Hidroksikuinolin. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 19(3), 94-98. Qodri A.A., 2011, *Fotodegradasi Zat Warna Remazol Yellow FG dengan Fotokatalis Komposit TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>*, Surakarta : Universitas Sebelas Maret Jurusan Kimia.
- Indriyanti, R., Effendy, & Fariati. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Senyawa Kompleks Zink(II) Sulfat dan 1,4-Bis(Difenilfosfino) Butana dengan Stoikiometri 1:1. *Jurnal MIPA dan Pembelajarannya*, 2(5), 357-363.
- Jacob, W. T., Roland, G. S. M., Aaron, G., & Heather, J. K. (2025). Graph neural networks for predicting metal-ligand coordination of transition metal complexes. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 122(41), 1-12.
- Jain, S., & Joshi, B. S. (2021). Synthesis and Characterization of Zinc (II) Complexes with Pyruvic Acid Salicylhydrazone. *Rasayan Journal of Chemistry*, 14(3), 1514-1520.
- Lely, N., Yulisa, S., & Sirumapea, L. (2019). Sintesis dan Karakterisasi Senyawa Kompleks Zn(II) Sulfametoksazol dan Schiff Base dari Sulfametoksazol dan Vanillin serta

- Uji Aktivitas Antibakteri Salmonella thypi. *Jurnal Penelitian Sains*, 21(2), 101-106.
- Mahreni, M., Ristianingsih, Y., & Suhascaryo, N. (2020). *Sintesis dan Aplikasi Material Baru Kerangka Logam Organik (Metal Organic Framework, MOF)*. Yogyakarta: LPPM UPN Veteran Yogyakarta.
- Muratov, B. A., et al. (2024). Synthesis of the Complex Compounds of Zn (II) and Co (II) with Isoniazid (Pyridine-4-Carbohydrazide). *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72(8), 244-252.
- Muthia, A., Gusrizal, & Destiarti, L. (2022). Sintesis Kompleks Zn(II) dengan Asam Humat Menggunakan Variasi pH dan Konsentrasi. *E-Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 10(1), 1-8.
- Putri, A. L., Setyawati, H., & Sumarsih, S. (2019). Sintesis, Karakterisasi dan Uji Aktivitas Senyawa Kompleks Zn(II)-Katekin Sebagai Inhibitor Enzim Lipase. *Jurnal Kimia Riset*, 4(1), 33-39.
- Rahmalia, W., Prayitno, D. I., Adhitiyawarman, & Septiani. (2023). Sintesis dan Uji Fotostabilitas Kompleks Zn(II)-Astaxanthin. *Jurnal Riset Kimia*, 14(1), 51-60.
- Setyawati, H., Sumarsih, S., & Ayuningtyas, S. (2017). Sintesis dan karakterisasi senyawa kompleks Zn(II)-EDTA sebagai senyawa antialga pada cooling water industri. *Jurnal Kimia Riset*, 2(1), 43-50.
- Sumarsih, S., Putri, A. L., & Setyawati, H. (2019). Sintesis, karakterisasi dan uji aktivitas senyawa kompleks Zn(II)-katekin sebagai inhibitor enzim lipase. *Jurnal Kimia Riset*, 4(1), 33-39.
- Ulum, B., Kurniawan, F., & Ulfin, I. (2018). Sintesis Senyawaan Seng Secara Elektrolisis. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 7(2), 15-17.