

## TEKNIK-TEKNIK KARAKTERISASI EKSPERIMENTAL DALAM ANALISIS KOMPLEKS LOGAM TRANSISI

### EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION TECHNIQUES FOR TRANSITION METAL COMPLEX ANALYSIS

**Husna Syaima\***

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman  
Jalan Barong Tongkok No. 4, Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75123, Kalimantan Timur, Indonesia

\* Corresponding Author : [husna.syaima@fmipa.unmul.ac.id](mailto:husna.syaima@fmipa.unmul.ac.id)

#### ABSTRACT

Due to their diverse properties and functionalities, metal complexes are central to various applications spanning chemistry, materials science, and beyond. The elucidation of metal complexes through rigorous analysis is paramount for understanding their structure, properties, and potential applications. This review article provides an overview of the techniques employed for analyzing metal complexes and highlights the importance of instrumental techniques utilized. Techniques such as X-ray crystallography, thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermal analysis (DTA), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), and X-ray diffraction (XRD) are discussed in detail, showcasing their roles in probing different aspects of metal complex chemistry. By employing these analytical techniques, researchers can gain valuable insights into metal complexes' composition, structure, thermal stability, and electronic properties, driving innovation and progress in various scientific and technological fields. Continuous advancements in analytical techniques further enhance capabilities in metal complex analysis, paving the way for ground-breaking discoveries and transformative advancements in chemistry and related disciplines.

**Keywords:** Metal Complex, Crystallography, TG/DTA, FTIR, UV-Vis.

#### 1. PENDAHULUAN

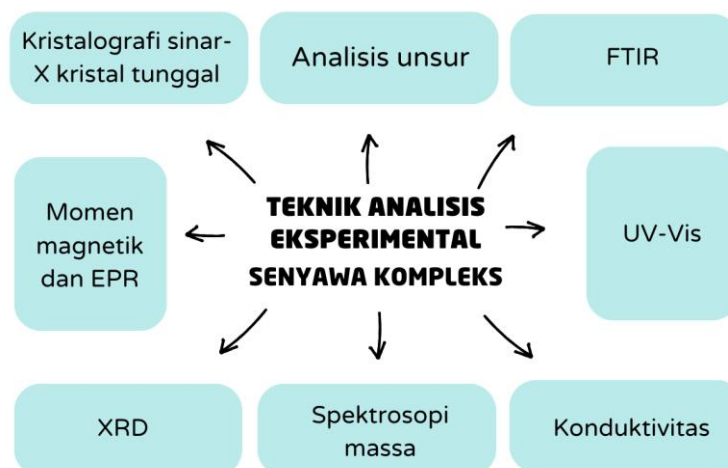
Kompleks logam, yang terdiri dari ion logam pusat yang dikelilingi oleh ligan, merupakan tipe senyawa dengan penerapan yang luas [1]. Kompleks logam menunjukkan berbagai sifat fisik, kimia, dan biologi sehingga menjadikannya kandidat material dalam bidang seperti katalisis [2], kedokteran [3,4], dan ilmu material [5]. Memahami struktur dan sifat kompleks logam merupakan hal mendasar untuk memanfaatkan potensinya dalam berbagai aplikasi. Oleh karena itu, studi mengenai karakteristik kompleks logam melalui analisis yang cermat sangat dibutuhkan dalam penelitian ilmiah dan aplikasi industri.

Analisis kompleks logam melibatkan studi eksperimental dan teoritikal komprehensif terhadap komposisi, struktur, dan sifat-sifatnya. Proses ini diperlukan untuk mengidentifikasi lingkungan koordinasi ion logam, sifat interaksi ligan-logam, dan geometri kompleks secara keseluruhan. Lebih jauh lagi, penjelasan perilaku kompleks logam dalam berbagai kondisi, seperti suhu, tekanan, dan pelarut, memberikan wawasan tentang stabilitas, reaktivitas, dan potensi penerapannya [6]. Untuk mencapai hal ini, berbagai teknik dan instrumen analisis telah digunakan untuk menyelidiki berbagai aspek kimia kompleks logam seperti yang tertera pada **Gambar 1**. Kristalografi sinar-X merupakan teknik yang ampuh untuk menentukan struktur tiga dimensi kompleks logam yang tepat pada tingkat atom [7]. Analisis termogravimetri (TGA) dan analisis termal diferensial (DTA) digunakan untuk menyelidiki stabilitas termal, kinetika dekomposisi, dan stoikiometri kompleks logam dalam berbagai kondisi suhu [8]. Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) dan spektroskopi ultraviolet-visibel (UV-Vis) menawarkan wawasan tentang sifat elektronik [9] dan

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



vibrasi gugus fungsi pada kompleks logam [10], memfasilitasi identifikasi ligan dan penentuan bilangan oksidasi logam [11]. Selain itu, difraksi sinar-X (XRD) memberikan informasi tentang struktur kristal kompleks logam, termasuk parameter kisi, dimensi unit sel, dan simetri kristal [12,13]. Teknik-teknik lainnya seperti AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*), NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*), penentuan kemagnetan (kerentanan magnetik dan resonansi paramagnetik elektron), spektrometri massa, SEM, TEM serta konduktivitas juga sangat mendukung studi karakteristik dan struktur senyawa kompleks [14, 15, 16].



**Gambar 1.** Teknik analisis senyawa kompleks

Pemanfaatan kombinasi teknik analisis memungkinkan peneliti memperoleh wawasan komprehensif mengenai perilaku kompleks logam di berbagai lingkungan. Pengetahuan ini sangat berharga untuk merancang material baru, mengembangkan katalis yang efisien, dan memajukan pemahaman tentang ikatan kimia dan reaktivitas dalam kimia kompleks logam [17]. Oleh karena itu, kemajuan berkelanjutan dalam metode dan teknik analisis kompleks logam dapat mendorong inovasi dan kemajuan di bidang kimia dan bidang terkait.

Artikel review ini membahas gambaran umum tentang beberapa teknik utama khususnya analisis unsur, kristalografi sinar-X, TG/DTA, FTIR, dan spektroskopi UV-Vis yang digunakan untuk elusidasi kompleks logam, serta menyoroti prinsip, penerapan, dan signifikansinya dalam menjelaskan struktur dan perilaku kompleks.

## 2. METODE

Sumber data yang digunakan pada artikel review ini adalah referensi dari basis data Scencedirect dan Scopus terkait "metal complex". Kata kunci yang digunakan berupa "metal complex"; "metal complexes" dan kata kunci lain yang spesifik sesuai subbab terkait. Ruang lingkup referensi adalah artikel mengenai kompleks logam transisi dari tahun 2020-2024 atau lima tahun terakhir.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Analisis Unsur

Analisis unsur adalah teknik analisis yang diterapkan dalam bidang kimia untuk menentukan komposisi unsur senyawa dan komposisinya. Melalui teknik ini, dapat ditentukan komposisi dan persen massa unsur yang terkandung dalam zat uji untuk menetapkan rumus empiris [18]. Setelah massa molekul keseluruhan senyawa yang diuji diketahui, hasil analisis memungkinkan rumus molekul dapat ditentukan. Dalam senyawa kompleks logam, analisis unsur biasanya mengacu pada analisis elemen karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) serta ion logamnya. Presentase komposisi unsur secara eksperimen dibandingkan dengan analisis unsur secara teori untuk memvalidasi kemurnian senyawa karena hasil yang diperoleh memiliki konsistensi yang signifikan seperti yang ditampilkan

pada Tabel 1. Teknik ini dapat digunakan untuk menentukan komposisi elemen dalam kompleks logam, yang dapat membantu dalam memahami formula molekul dan struktur kompleks [19].

**Tabel 1.** Data penentuan rumus empiris senyawa kompleks logam dengan analisis unsur

| Rumus empiris kompleks                | % C eksperimen (teoritis) | % H eksperimen (teoritis) | % N eksperimen (teoritis) | % logam eksperimen (teoritis) | Referensi |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|
| $C_{24}H_{16}N_2CuCl_2$               | 62,0<br>(61,7)            | 4,0<br>(3,5)              | 5,7<br>(6,0)              | -                             | [20]      |
| $C_{22}H_{28}O_4N_2Ni$                | 60,01<br>(59,56)          | 6,91<br>(6,31)            | 6,80<br>(6,31)            | (13,2)                        | [21]      |
| $C_{12}H_{12}N_2Cl_4N \cdot 0,25H_2O$ | 26,11<br>(26,68)          | 2,80<br>(2,24)            | 5,18<br>(5,18)            | -                             |           |
| $C_{24}H_{32}O_2N_2Co$                | 65,8<br>(65,5)            | 7,1<br>(7,3)              | 6,5<br>(6,3)              | (13,4)                        | [22]      |
| $C_{13}H_{13}Cl_4CoNO_4$              | 35,34<br>(34,85)          | 3,25<br>(2,92)            | 4,27<br>(3,13)            | 14,32<br>(13,15)              | [23]      |
| $C_{13}H_{13}Cl_4NiNO_4$              | 35,56<br>(34,87)          | 3,42<br>(2,93)            | 4,71<br>(3,13)            | 14,46<br>(13,11)              |           |
| $C_{13}H_{13}Cl_4CuNO_4$              | 35,72<br>(34,50)          | 3,39<br>(2,90)            | 4,52<br>(3,09)            | 15,34<br>(14,04)              |           |
| $C_{13}H_{13}Cl_4ZnNO_4$              | 35,15<br>(34,36)          | 3,47<br>(2,88)            | 4,09<br>(3,08)            | 15,56<br>(14,39)              |           |

### 3.2 Kristalografi Sinar-X Kristal Tunggal

Kristalografi sinar-X kristal tunggal merupakan teknik analisis yang terpenting di antara teknik-teknik analisis senyawa kompleks lainnya. Teknik non-destruktif ini memberikan ketepatan tinggi dalam menentukan struktur tiga dimensi molekul [24]. Kristalografi juga digunakan untuk menentukan struktur kristal molekul secara akurat berdasarkan pola difraksi sinar-X yang dipetakan untuk menentukan posisi atom-atom dalam molekul. Informasi tentang jarak dan sudut antar atom dapat diperoleh dari analisis ini dan digunakan untuk memahami geometri molekul dan ikatan antar atom. Dengan melakukan analisis difraksi sinar-X pada kompleks logam, susunan atom yang tepat di dalam kisi kristal dapat ditentukan sehingga menjelaskan panjang ikatan, sudut, dan geometri keseluruhan [25]. Teknik ini berfungsi sebagai landasan untuk memahami arsitektur kompleks logam yang rumit, memfasilitasi desain dan penyesuaiannya yang rasional.

### 3.3 TG/DTA (Thermogravimetric Analysis/Differential Thermal Analysis)

Teknik ini digunakan untuk mempelajari perubahan berat (TG) dan perubahan suhu (DTA) suatu sampel seiring waktu dan/atau suhu. Untuk kompleks logam, TG/DTA dapat memberikan informasi tentang stabilitas termal, dekomposisi, dan kandungan air atau ligan yang terikat [26]. Tabel 2 menunjukkan data analisis senyawa kompleks yang dianalisis dengan instrumen TG/DTA.

**Tabel 2.** Data TG/DTA beberapa senyawa kompleks

| Senyawa kompleks                                                                                                                    | Rentang suhu termogravimetri (°C) | Pengurangan massa (%) | Suhu DTA (°C) | Keterangan                                                       | Referensi |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Mn(II)-diethyl-(2-hydroxyphenyl)(phenylamino)methylphosphonate</i>                                                               | 100-155                           | 2,34                  | 116           | Pelepasan air kristal                                            | [27]      |
| <i>Fe(III)-diethyl-(2-hydroxyphenyl)(phenylamino)methylphosphonate</i>                                                              | 110-165                           | 1,46                  | 114           | Pelepasan air kristal                                            | [27]      |
| <i>[Cr(4-((Z)-((2-((E)-((2-hydroxyphenyl)methylidene)amino)ethyl)imino)methyl)-2-methoxyphenol)](H<sub>2</sub>O)Cl<sub>2</sub>]</i> | 220-422                           | -                     | 343           | Dekomposisi ligan dan pembentukan Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | [28]      |
| <i>[Cu<sub>2</sub>(DS)(OAc)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>].2H<sub>2</sub>O, DS =</i>                                      | 27-68                             | 5,676                 | -             | Penguapan air kristal                                            | [29]      |

|                              |         |       |                              |             |
|------------------------------|---------|-------|------------------------------|-------------|
| ligan pyridine bis-hydrazide | 69–215  | 4,113 | Pelepasan terkoordinasi      | air         |
|                              | 216–352 | 2,620 | Pelepasan piridin dan asetat | cincin asam |

### 3.4 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

Spektroskopi IR digunakan untuk mengidentifikasi ikatan kimia dalam suatu molekul dengan menganalisis serapan gelombang inframerah yang dihasilkan oleh perubahan getaran dan rotasi molekul. Teknik ini membantu dalam identifikasi ligan, struktur kompleks, dan interaksi antara ligan dan ion logam. Pada praktiknya, analisis spektra inframerah pada senyawa kompleks dilakukan dengan membandingkan nilai absorbansi ligan dengan senyawa kompleksnya. Pergeseran nilai absorbansi mengindikasikan adanya ikatan koordinasi pada gugus tersebut [30].

Pichandi dan Shanmugam (2024) melaporkan adanya pita serapan inframerah yang signifikan pada bilangan gelombang  $3309\text{ cm}^{-1}$  dan  $1616\text{ cm}^{-1}$  yang disebabkan oleh getaran regangan gugus oksigen fenolik (ikatan tunggal H) dan azometin (ikatan ganda N) [31]. Setelah dikomplekskan dengan ion logam, pita IR dari gugus azometin ( $\text{C}=\text{N}$ ) dan karboksilat ( $\text{COO}^-$ ) bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan adanya koordinasi antara ion logam pusat dengan ligan melalui kedua gugus tersebut, Hal ini diperkuat dengan pita-pita serapan baru pada kisaran  $575\text{--}521\text{ cm}^{-1}$  dan  $444\text{--}425\text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan ikatan pada gugus M-N dan M-O dengan  $\text{M} = \text{Cu(II)}, \text{Ni(II)}, \text{Cu(II)}$  dan  $\text{Zn(II)}$  [32].

Pada penelitian Sunitha et al. (2023), nilai bilangan gelombang  $\text{C}=\text{N}$  kompleks lebih rendah dibandingkan ligannya [33]. Hal ini disebabkan adanya pengikatan nitrogen dengan ion logam. Tidak adanya gugus  $-\text{OH}$  fenolik dalam kompleks logam mengkonfirmasi terjadinya deprotonasi dan terbentuknya ikatan ligan dengan oksigen. Serapan C-O dari gugus fenolik muncul pada serapan  $1273\text{--}1246\text{ cm}^{-1}$  dalam kompleks yang dibandingkan dengan ligan menunjukkan khelasi atom oksigen fenolat ke logam.

### 3.5 Spektrosopi UV-Vis (Ultraviolet-Visible)

Spektroskopi UV-Vis digunakan untuk mempelajari transisi elektron dalam molekul, khususnya kompleks logam. Spektrum UV-Vis dapat memberikan informasi tentang struktur elektronik kompleks, termasuk identifikasi ligan dan penentuan bilangan oksidasi logam. Aplikasi UV-Vis dapat dilihat pada penelitian Kumar (2022) [34]. Pada penelitian tersebut,  $[\text{MnL}(\text{H}_2\text{O})_2]$  menunjukkan pita pada  $14.100\text{ cm}^{-1}$ ,  $20.400\text{ cm}^{-1}$  dan  $24.200\text{ cm}^{-1}$  sesuai dengan transisi  ${}^6\text{A}_{1g} \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}$ ,  ${}^6\text{A}_{1g} \rightarrow {}^4\text{T}_{2g}$  dan  ${}^6\text{A}_{1g} \rightarrow {}^4\text{E}_g$  dari kompleks  $\text{Mn(II)}$  oktahedral. Kompleks  $[\text{CoL}]$  menunjukkan pita pada  $7640$ ,  $8750$  dan  $15900\text{ cm}^{-1}$  dan yang menunjukkan transisi  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_2$  ( $\nu_1$ ),  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1$  ( $\nu_2$ ) dan  ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1$  (P) ( $\nu_3$ ) transisi kompleks  $\text{Co(II)}$  tetrahedral ( $\text{L} = 3\text{--}((2\text{--}((1\text{--}(2\text{--hydroxyphenyl)ethylidene)amino)ethyl)imino)\text{--}N\text{--}(o\text{--tolyl)butanamide})$ .

Kompleks Nikel(II) pada penelitian Hrioua et al. (2021) menunjukkan dua pita puncak pada  $269\text{ nm}$  dan  $342\text{ nm}$ , yang masing-masing berasal dari transisi  $\pi \rightarrow \pi^*$  dan  $n \rightarrow \pi^*$  [35]. Adanya pita kompleks  $\text{Ni(II)}$  pada spektrum elektronik  $438\text{--}711\text{ nm}$  membuktikan adanya geometri oktahedral. Pita serapan berdensitas rendah pada spektrum kompleks  $\text{Ni(II)}$  ini mungkin menunjukkan transisi *LMCT* (*Ligand-to-Metal Charge Transfer*) dan  $d \rightarrow d$ . Selain dari data serapannya, indikasi geometri pada senyawa kompleks dapat pula diperkuat dengan analisis lainnya seperti data kerentanan magnetik. Gabungan analisis kedua teknik tersebut sesuai dengan penelitian. Pada penelitian tersebut, kompleks  $[\text{Co(ENB)}_2]$  menunjukkan transisi  ${}^4\text{T}_{1g}(\text{F}) \rightarrow {}^4\text{A}_{2g}(\text{F})$  pada  $25.125\text{ cm}^{-1}$  dan momen magnetnya  $3,7\text{ BM}$  menunjukkan geometri oktahedral yang terdistorsi ( $\text{ENB} = 4\text{--}\{[(\text{E})\text{--}(2\text{--hydroxy-3-}[(\text{Z})\text{--}1,3\text{thiazol-2-yl}]\text{diazeneyl}]\text{naphtalen-1-yl}\}\text{methylidene}\}\text{amino}\}\text{benzoic acid}$ ). Kompleks lainnya yaitu  $[\text{Ni(ENB)}_2]$  menunjukkan dua pita pada  $20.080$  dan  $28.901\text{ cm}^{-1}$  dari transisi  ${}^3\text{A}_{2g} \rightarrow {}^3\text{T}_{1g}(\text{F})$  dan  ${}^1\text{A}_{2g} \rightarrow {}^2\text{T}_{1g}(\text{F})$ , dan momen magnetnya adalah  $2,9\text{ BM}$  sehingga mengindikasikan geometri oktahedral. Kompleks  $[\text{Cu(ENB)}_2\text{Cl}_2]$  menghubungkan dua pita serapan pada  $29.791$  dan

16.129 cm<sup>-1</sup> karena transisi  $^2B_{1g} \rightarrow ^2A_{2g}$  dan  $^1A_{2g} \rightarrow ^2T_{1g}(F)$  dengan momen magnetnya 1,96 BM, sehingga diharapkan bergeometri oktahedral. Pada kompleks tersebut, posisi serapan pada spektrum kompleks bergeser jika dibandingkan dengan spektrum ligan akibat perpindahan muatan dari ligan ke logam.

Kombinasi teknik-teknik ini memungkinkan para peneliti untuk memahami sifat fisikokimia kompleks logam secara komprehensif, termasuk struktur, stabilitas, dan reaktivitasnya. Dengan demikian, teknik-teknik karakterisasi di atas merupakan alat yang sangat penting dalam analisis kompleks logam.

#### 4. KESIMPULAN

Analisis kompleks logam memainkan peran penting dalam memajukan pemahaman tentang struktur, sifat, dan potensi penerapannya di berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Pemanfaatan berbagai teknik analisis seperti kristalografi sinar-X, TGA/DTA, FTIR, UV-Vis, dan analisis unsur dapat menjelaskan detail rumit kimia kompleks logam dengan presisi dan akurasi yang baik. Teknik-teknik tersebut memungkinkan penentuan struktur kompleks, identifikasi ligan, penilaian stabilitas termal, dan karakterisasi sifat elektronik dan getaran, serta aspek lainnya.

Wawasan yang diperoleh dari analisis kompleks logam tidak hanya berkontribusi pada pengetahuan dasar di bidang kimia namun juga mendorong inovasi dalam ilmu material, katalisis, kedokteran, dan lainnya. Dengan memahami perilaku kompleks logam dalam berbagai kondisi, para peneliti dapat merancang material baru dengan sifat yang disesuaikan, mengembangkan katalis yang lebih efisien untuk transformasi kimia, dan mencari alternatif untuk intervensi terapeutik dalam bidang kedokteran. Selain itu, penjelasan struktur dan sifat kompleks logam memberikan data-data tentang prinsip dasar yang mengatur ikatan kimia dan reaktivitas dalam kimia koordinasi. Kemajuan berkelanjutan dalam teknik dan instrumentasi analisis dapat meningkatkan eksplorasi baru dalam bidang kimia dan disiplin ilmu terkait.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Elattar, R. H., El-Malla, S. F., Kamal, A. H., & Mansour, F. R. (2024). Applications of metal complexes in analytical chemistry: A review article. *Coordination Chemistry Reviews*, 501, 215568. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2023.215568>
- [2] Wang, W., Qu, S., Li, X., Chen, J., Guo, Z., & Sun, W. H. (2023). Transition metal complex catalysts promoting copolymers of cycloolefin with propylene/higher olefins. *Coordination Chemistry Reviews*, 494, 215351. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2023.215351>
- [3] Abdolmaleki, S., Khaksar, S., Aliabadi, A., Panjehpour, A., Motieyan, E., Marabello, D., Faraji, M. H., & Beihaghi, M. (2023). Cytotoxicity and mechanism of action of metal complexes: An overview. *Toxicology*, 492, 153516. <https://doi.org/10.1016/J.TOX.2023.153516>
- [4] Bourouai, M. A., Bouchoucha, A., Si Larbi, K., Cosnier, S., & Djebbar, S. (2024). Novel Mn(II) and Cu(II) metal complexes with sulfa drug-derived ligands as potent antimicrobial and anticancer agents: In vitro studies, ADMET profile and molecular docking. *Polyhedron*, 253, 116914. <https://doi.org/10.1016/J.POLY.2024.116914>
- [5] Teng, K. L., Lin, X. Y., Liu, S. H., Yu, Y. H., Tsai, C. H., Yang, B. X., & Chien, S. Y. (2024). Nitrogen, sulfur coordinated metal complex and reduced graphene oxide hybrid materials as counter electrodes for application in dye-sensitized solar cells. *Organic Electronics*, 125, 106977. <https://doi.org/10.1016/J.ORGEL.2023.106977>
- [6] Kumar, N., Kaushal, R., & Awasthi, P. (2023). Non-covalent binding studies of transition metal complexes with DNA: A review. *Journal of Molecular Structure*, 1288, 135751. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2023.135751>
- [7] Micallella, C., Martignon, S., Bruno, S., Pioselli, B., Caglio, R., Valetti, F., Pessione, E., Giunta, C., & Rizzi, M. (2011). X-ray crystallography, mass spectrometry and single

- crystal microspectrophotometry: A multidisciplinary characterization of catechol 1,2 dioxxygenase. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*, 1814(6), 817–823. <https://doi.org/10.1016/J.BBAPAP.2010.09.008>
- [8] Zygmuntowicz, J., Wiecińska, P., Wachowski, M., Kurek, M., & Kaszuwara, W. (2023). Thermogravimetric analysis coupled with mass spectrometry of ceramic-metal ternary composites Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu-Mo. *Measurement*, 217, 113049. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113049>.
- [9] Gokce, H., & Bahçeli, S. (2013). FT-IR, Micro-Raman and UV-vis spectroscopic and quantum chemical investigations of free 2,2'-dithiodipyridine and its metal (Co, Cu and Zn) halide complexes. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 114, 61–73. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2013.04.112>
- [10] Lanigan, K. C., & Pidsosny, K. (2007). Reflectance FTIR spectroscopic analysis of metal complexation to EDTA and EDDS. *Vibrational Spectroscopy*, 45(1), 2–9. <https://doi.org/10.1016/J.VIBSPEC.2007.03.003>
- [11] Liu, Z., Wu, X., Gao, T., Zhang, M., Min, X., Chen, W., & Tang, C. J. (2024). Rapid monitoring of heavy metal-ammonia complexes in solutions by UV-vis/ATR-FTIR spectroscopy and chemometric models. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148692. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.148692>
- [12] Aly, S. A., & Fathalla, S. K. (2020). Preparation, characterization of some transition metal complexes of hydrazone derivatives and their antibacterial and antioxidant activities. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(2), 3735–3750. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2019.12.003>
- [13] Raja, P. B., Munusamy, K. R., Perumal, V., & Ibrahim, M. N. M. (2022). Characterization of nanomaterial used in nanobioremediation. *Nano-Bioremediation: Fundamentals and Applications*, 57–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823962-9.00037-4>
- [14] Pervaiz, M., Shahin, M., Ejaz, A., Quratulain, R., Saeed, Z., Ashraf, A., Rashad Mahmood Khan, R., Majid Bukhari, S., Ullah, S., & Younas, U. (2024). An overview of Aniline-Based Schiff base metal Complexes: Synthesis, characterization and biological activities - a review. *Inorganic Chemistry Communications*, 159, 111851. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2023.111851>
- [15] Saeed, S., Al-Harbi, T., Alhakimi, A., & Abd El-Hady, M. (2022). Synthesis and Characterization of Metal Complexes Based on Aniline Derivative Schiff Base for Antimicrobial Applications and UV Protection of a Modified Cotton Fabric. *Coatings*, 12(8), 1181. <https://doi.org/10.3390/coatings12081181>
- [16] Travadi, M., Jadeja, R. N., Butcher, R. J., & Shekhawat, M. S. (2024). Neodymium based acylpyrazolone complexes: Synthesis and physicochemical characterizations. *Inorganica Chimica Acta*, 559, 121766. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2023.121766>
- [17] Karges, J., Stokes, R. W., & Cohen, S. M. (2021). Metal complexes for therapeutic applications. *Trends in Chemistry*, 3(7), 523–534. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.03.006>
- [18] Frąckowiak, E., Płatek-Mielczarek, A., Piwek, J., & Fic, K. (2022). Advanced characterization techniques for electrochemical capacitors. *Advances in Inorganic Chemistry*, 79, 151–207. <https://doi.org/10.1016/BS.ADIOCH.2021.12.006>
- [19] Sharma, N., Kumar, D., Shrivastava, R., Shrivastava, S., & Kant Awasthi, K. (2021). Synthesis and spectral studies of lanthanide metal tetraaza macrocyclic complexes. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1760–1765. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.1225>
- [20] Fomenko, I. S., Gongola, M. I., Shul'pina, L. S., Shul'pin, G. B., Ikonnikov, N. S., Kozlov, Y. N., & Gushchin, A. L. (2024). Copper(II) complexes with BIAN-type ligands: Synthesis and catalytic activity in oxidation of hydrocarbons and alcohols. *Inorganica Chimica Acta*, 565, 121990. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2024.121990>
- [21] Sindhu, S., & Arockiasamy, S. (2024). Synthesis, crystal structure, thermal stability and biological study of bis{(2-methoxy-6-[(E)-(propylimino)methyl]phenolato}nickel(II) complex. *Heliyon*, 10(2), e24108. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E24108>

- [22] Sindhu, S., Roniboss, A., & Arockiasamy, S. (2024). Synthesis, crystal structure, thermal properties of a homoleptic Schiff base cobalt complex bis(N-tert-pentyl salicylaldimine)cobalt(II) as precursor for coating Co3O4 thin film by a plasma enhanced MOCVD. *Inorganica Chimica Acta*, 559, 121767. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2023.121767>
- [23] Prabhakar, U. P. S., Periyasami, G., & Karthikeyan, P. (2024a). Nanostructured Metal Oxides Synthesized via Simple Thermal Decomposition of Co(II), Ni(II), Cu(II), and Zn(II) Schiff Base Complexes: Characterization and Antimicrobial Activity. *Inorganic Chemistry Communications*, 159, 111796. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2023.111796>
- [24] Pal, S. (2023). X-ray crystallography. *Mathematical Approaches to Molecular Structural Biology*, 211–233. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90397-4.00007-X>
- [25] Nachiappan, M., Guru Raj Rao, R., Richard, M., Prabhu, D., Rajamanikandan, S., Chitra, J. P., & Jeyakanthan, J. (2021). 3D Structural Determination of Macromolecules Using X-ray Crystallography Methods. *Molecular Docking for Computer-Aided Drug Design: Fundamentals, Techniques, Resources and Applications*, 119–140. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822312-3.00007-2>
- [26] Khanum, R., Shoukat Ali, R. A., Rangaswamy, H. R., Santhosh Kumar, S. R., Prashantha, A. G., & Jagadisha, A. S. (2023). Recent review on Synthesis, spectral Studies, versatile applications of azo dyes and its metal complexes. *Results in Chemistry*, 5, 100890. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2023.100890>
- [27] Juyal, V. K., Chand Thakuri, S., Panwar, M., Prakash, O., & Nand, V. (2023). Synthesis, characterization, and in silico molecular docking study of bidentate hydroxy  $\alpha$ -aminophosphonates derivative and its Mn(II), Fe(III) and Zn(II) metal complexes as potent antioxidant and antibacterial agents. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100(8), 101041. <https://doi.org/10.1016/J.IJCS.2023.101041>
- [28] Ejidike, I. P., Direm, A., Parlak, C., Adeniyi, A. A., Azam, M., Ata, A., Eze, M. O., Hollett, J. W., & Clayton, H. S. (2024). Spectroscopic characterization, DFT calculations, in vitro pharmacological potentials, and molecular docking studies of N, N, O-Schiff base and its trivalent metal complexes. *Chemical Physics Impact*, 8, 100549. <https://doi.org/10.1016/J.CHPHI.2024.100549>
- [29] Gomaa, A. I., Gomaa, E. A., Zaky, R. R., & Abd El-Hady, M. N. (2024). Design and Synthesis of Pyridine Bis-Hydrazone Metal Complexes of Co(II), Cu(II), and Hg(II): Spectral, Gaussian, Electrochemical, Biological, Drug-Likeness and Molecular Docking Investigations. *Inorganic Chemistry Communications*, 162, 112188. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2024.112188>
- [30] Prabhakar, U. P. S., Periyasami, G., & Karthikeyan, P. (2024b). Nanostructured Metal Oxides Synthesized via Simple Thermal Decomposition of Co(II), Ni(II), Cu(II), and Zn(II) Schiff Base Complexes: Characterization and Antimicrobial Activity. *Inorganic Chemistry Communications*, 159, 111796. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2023.111796>
- [31] Pichandi, M., & Shanmugam, S. (2024). Synthesis, characterization of Schiff base metal complexes with 1, 3 propanediamine as secondary chelates and their DNA binding, DNA cleavage, cytotoxicity, antioxidant and activities. *Journal of Molecular Structure*, 1307, 137932. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2024.137932>
- [32] Dawar, N., Devi, J., Kumar, B., & Dubey, A. (2023). Synthesis, Characterization, Pharmacological Screening, Molecular Docking, DFT, MESP, ADMET Studies of Transition Metal(II) Chelates of Bidentate Schiff Base Ligand. *Inorganic Chemistry Communications*, 151, 110567. <https://doi.org/10.1016/J.INOCHE.2023.110567>
- [33] Sunitha, N., Raj, C. I. S., & Kumari, B. S. (2023). Synthesis, spectral studies, biological evaluation and molecular docking studies of metal complexes from coumarin derivative. *Journal of Molecular Structure*, 1285, 135443. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2023.135443>

- 
- [34] Subin Kumar, K. (2022). Design, one-pot synthesis, cytotoxic, in vivo anticancer, antioxidant and antimicrobial evaluation of a novel mixed schiff base ligand and its metal complexes. *Results in Chemistry*, 4, 100463. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2022.100463>
- [35] Hrioua, A., Loudiki, A., Farahi, A., Laghrib, F., Bakasse, M., Lahrich, S., Saqrane, S., & El Mhammedi, M. A. (2021). Complexation of amoxicillin by transition metals: Physico-chemical and antibacterial activity evaluation. *Bioelectrochemistry*, 142, 107936. <https://doi.org/10.1016/J.BIOELECHEMA.2021.107936>