

APLIKASI *METAL-ORGANIC FRAMEWORKS* (MOF) BERBASIS LOGAM Zn DALAM DEGRADASI FOTOKATALITIK POLUTAN ORGANIK

UTILIZATION OF Zn-BASED METAL ORGANIC FRAMEWORKS FOR DEGRADATION OF ORGANIC POLLUTANTS

Ananda Fitra Yuda, Husna Syaima*

Program Studi Sarjana Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman

*Corresponding author: husna.syaima@fmipa.unmul.ac.id

Diterbitkan: 31 Oktober 2025

ABSTRACT

Photocatalytic degradation is a widely studied method for reducing the concentration of organic pollutants. This technique has proven effective in breaking down various organic compounds, including dyes, pharmaceuticals, and pesticides. Metal-Organic Frameworks (MOFs) represent a promising class of materials for photocatalytic degradation due to their favorable catalytic properties, such as high porosity and large surface area. Additionally, MOFs offer structural tunability, allowing their properties to be tailored for specific applications. This review discusses the structural characteristics, photocatalytic mechanisms, synthesis strategies, current applications, and the future prospects and challenges of Zn-based MOFs in the photocatalytic degradation of organic pollutants.

Keywords: Metal-Organic Frameworks, Zinc, Photocatalytic Degradation

ABSTRAK

Degradasi fotokatalitik merupakan metode yang sering diteliti untuk mengurangi jumlah polutan organik. Metode degradasi ini telah terbukti efektif dalam degradasi berbagai zat kimia organik yang meliputi zat pewarna, obat-obatan dan pestisida. *Metal-Organic Frameworks* (MOF) merupakan salah satu kelas material yang dapat diaplikasikan dalam degradasi fotokatalitik karena sifat yang mendukung dalam proses katalisis, seperti porositas yang besar dan luas permukaan yang tinggi. MOF juga menawarkan keleluasaan dalam pengaturan struktur, sehingga dapat dengan mudah menyesuaikan dengan sifat yang diinginkan. Review ini akan membahas berbagai struktur, mekanisme fotokatalisis, strategi sintesis, berbagai aplikasi yang telah dilakukan, serta prospek dan tantangan aplikasi MOF berbasis Zn dalam degradasi fotokatalitik polutan organik.

Kata kunci: *Metal-Organic Frameworks*, Seng, Degradasi Fotokatalitik

PENDAHULUAN

Pencemaran oleh polutan organik menjadi masalah di Indonesia. Berbagai macam aktivitas masyarakat menghasilkan limbah organik, mulai dari aktivitas rumah tangga dan pertanian [1]. Biasanya polutan berupa sisa pestisida, zat pewarna, dan juga obat-obatan yang dibuang ke lingkungan [2],[3]. Berbagai senyawa organik yang tidak dapat didegradasi secara biologis telah menarik perhatian karena toksisitas, bioakumulasi, dan ketahanannya terhadap pengaruh lingkungan [2]. Contoh kasus pencemaran terjadi di perairan Jakarta yang melibatkan senyawa aromatik

polisiklik, pestisida dan metabolit pestisida, surfaktan, beberapa prekursor produk kimia, dan produk perawatan serta metabolitnya [4]. Terdapat juga kasus pencemaran pestisida endapan situs pembudidayaan hewan air yang terhubung dengan badan sungai di Jawa Tengah [5]. Kasus-kasus tersebut melibatkan bahan kimia yang memiliki risiko tinggi untuk mengganggu kesehatan, sehingga muncul urgensi untuk penanganan secara tepat.

Penanganan pencemaran oleh senyawa organik dengan degradasi fotokatalitik telah diteliti secara ekstensif. Degradasi fotokatalitik menawarkan solusi yang ramah lingkungan untuk mengatasi pencemaran, karena menggunakan energi dari sinar matahari yang bersih dan terbarukan. Proses ini melibatkan dua peristiwa yang terjadi bersamaan, yaitu oksidasi oleh lubang h^+ dan reduksi oleh e^- , yang keduanya berasal dari induksi oleh cahaya terhadap katalis [6]. Induksi pembentukan h^+ dan e^- melibatkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu yang mencapai fotokatalis, mengakibatkan eksitasi elektron dari pita konduksi ke pita valensi [7]. Sebagian besar fotokatalis merupakan material semikonduktor, karena muatan yang terbentuk dalam semikonduktor relatif stabil dan mudah bergerak dari muatan yang terbentuk [8]. Beberapa katalis yang dapat dijumpai dalam degradasi fotokatalitik meliputi oksida logam, karbon nitrida grafitik (g-CN), *Metal-Organic Framework* (MOF), dan *Covalent Organic Framework* (COF) [6,8].

Metal-Organic Framework (MOF) merupakan kelompok material kristal berpori yang terdiri dari kluster logam (*Secondary Building Unit/SBU*) dan molekul penghubung (*linker*) organik. Struktur MOF terbentuk dari ikatan koordinasi antara SBU dan *linker* [9],[10]. Sifat-sifat yang identik dengan MOF adalah porositas yang besar, situs aktif yang homogen serta struktur fungsionalitas yang mudah diatur [10],[11]. Beberapa MOF menunjukkan sifat-sifat seperti material semikonduktor. Sifat-sifat semikonduktor pada beberapa MOF terjadi karena kluster logam berperan sebagai quantum dots semikonduktor, dan linker berperan sebagai antena dalam penangkapan cahaya [12]. Meskipun begitu, sebagian besar MOF tidak menunjukkan perilaku seperti semikonduktor pada biasanya. Metode lebih lanjut untuk aplikasi MOF dalam degradasi fotokatalitik adalah sebagai zat pembawa (*carrier*) spesi fotoaktif [13]. Penelitian tentang aplikasi MOF dalam degradasi fotokatalitik senyawa organik ada dalam jumlah besar, dan beberapa artikel review telah merangkum penelitian-penelitian aplikasi dalam bidang tersebut. Namun review tentang berbagai jenis MOF yang berbasis satu jenis logam masih terbatas jumlahnya. Pembahasan khusus tentang aplikasi MOF berbasis logam Zn masih terbatas, walaupun MOF berbasis logam Zn mencakup beberapa MOF yang sudah diteliti secara ekstensif dan memiliki toksisitas yang relatif rendah [14].

Berdasarkan latar belakang diatas, review ini akan membahas struktur, mekanisme fotokatalisis, strategi sintesis, berbagai aplikasi yang telah dilakukan, serta prospek dan tantangan aplikasi MOF berbasis Zn dalam degradasi fotokatalitik polutan organik.

METODOLOGI PENELITIAN

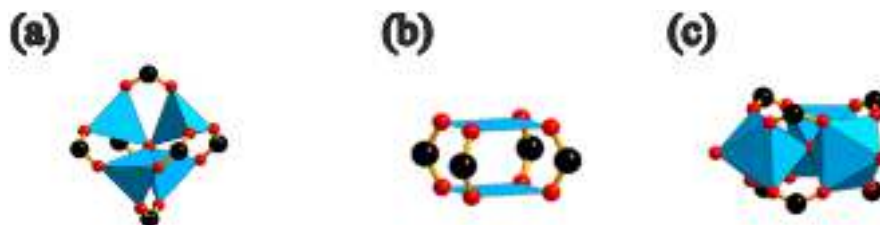
Review ini dilakukan dengan studi literatur berfokus pada perkembangan terkini aplikasi MOF berbasis Zn dalam degradasi senyawa organik, yang terbit dalam rentang waktu 2016-2025. Literatur ilmiah sebagai sumber data diambil dari Google Scholar, ScienceDirect, dan springer.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur MOF berbasis logam Zn

Logam Zn memiliki konfigurasi elektron berupa $[Ar]3d^{10}$ dan memiliki bilangan oksidasi yang paling umum sebesar +2. Zn (II) memiliki fleksibilitas dalam ikatan koordinasi. Bilangan koordinasi yang dapat dimiliki oleh Zn (II) berkisar dari 4 sampai 6, dengan geometri umum mencakup oktahedral, tetrahedral, trigonal bipyramidal dan square pyramidal [15]. Keberagaman geometri ini membuat MOF berbasis logam Zn dapat membentuk banyak SBU, yang menjadi dasar pembentukan struktur MOF yang berbeda. Di sisi lain, variasi *linker* dapat dijadikan parameter untuk mengatur ukuran dan dimensi MOF [16].

MOF berbasis Zn yang populer seperti MOF-5 (IRMOF-1) dan seluruh MOF dari kelompok IRMOF terdiri dari kluster $\text{Zn}_4\text{O}(\text{CO}_2)_6$ yang membentuk geometri oktahedral [17]. MOF berbasis Zn dari kelompok *Zeolitic Imidazolate Framework* (ZIF) memiliki SBU berupa Zn yang berkoordinasi dengan atom N secara tetrahedral [18]. MOF dengan SBU berupa kluster $\text{Zn}_2(\text{CO}_2)_4$ juga telah dikenal selama beberapa dekade dengan contoh MOF-2 sebagai pelopor dari kelompok ini. Contoh lainnya adalah HKUST-1 dan NU-110 [19]. SBU lain yang dapat ditemukan pada material MOF lain meliputi $\text{Zn}_3(\text{CO}_2)_6$ [20].



Gambar 1. (a) Struktur $\text{Zn}_4\text{O}(\text{CO}_2)_6$ (b) Struktur $\text{Zn}_2(\text{CO}_2)_4$ (c) Struktur $\text{Zn}_3(\text{CO}_2)_6$ [21]

Disamping beberapa SBU yang telah disebutkan di atas, MOF berbasis Zn juga dapat memiliki SBU yang tidak biasa dan merupakan MOF hasil sintesis eksploratif. Beberapa contoh struktur SBU dari MOF eksploratif adalah sebagai berikut:

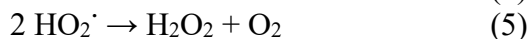
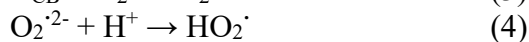
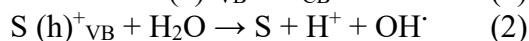
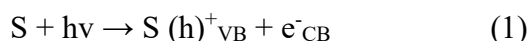
Tabel 1. Berbagai SBU MOF berbasis Zn hasil sintesis eksploratif

Kluster SBU	Referensi
ZnN_3O_3	[22]
$\text{ZnN}_2\text{O}_2\text{S}$	[23]
$\text{Zn}_5(\mu_3\text{-OH})_2(\text{COO})_6$	[24]
$\text{Zn}_3(\text{COO})_6(\text{DMF})_3$	[25]

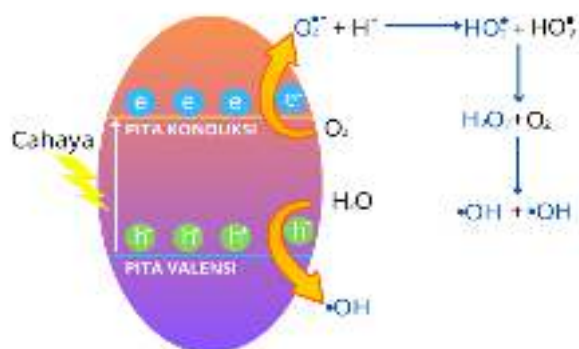
Mekanisme Fotokatalisis MOF berbasis logam Zn

Proses fotokatalisis oleh material MOF yang memiliki sifat-sifat semikonduktor dimulai dari penyerapan cahaya yang memiliki energi lebih besar dari *bandgap* MOF tersebut [10]. *Linker* organik memiliki peran diibaratkan seperti antena penangkap energi cahaya melalui penyerapan cahaya yang menyebabkan eksitasi elektron dari HOMO ke LUMO. Setelah terjadi eksitasi, pemisahan muatan elektron dan lubang elektron dapat terjadi dengan perpindahan elektron dari *linker* ke kluster logam Zn pada SBU [26]. Mekanisme ini disebut transfer muatan dari ligan ke logam (*Ligand to Metal Charge Transfer/LMCT*). Proses generasi elektron dapat juga terjadi oleh transfer muatan dari ligan ke ligan, atau logam ke ligan. Dalam kasus MOF berbasis Zn khususnya MOF-5 yang telah diketahui memiliki sifat seperti semikonduktor tradisional memiliki mekanisme generasi elektron melalui LMCT, atau dapat dianggap sebagai tranfer elektron dari ligan ke kluster [27].

Setelah pemisahan muatan terjadi, lubang h^+ dapat menyebabkan reaksi oksidasi terhadap terhadap molekul air menjadi $\text{OH}^\cdot$. Elektron akan menyebabkan reduksi terhadap O_2 menjadi $\text{O}_2^{\cdot-}$, yang selanjutnya akan berubah menjadi $\text{OH}^\cdot$. Reaksi pembentukan terjadi adalah sebagai berikut:



Radikal $\text{OH}^\cdot$ yang terbentuk akan bereaksi dengan polutan organik menghasilkan H_2O dan CO_2 [7].



Gambar 2. Mekanisme pembentukan radikal $\text{OH}^\bullet$, konsep diadaptasi dari referensi [7]

Walaupun MOF-5 sebagai MOF berbasis Zn yang paling banyak diteliti memiliki sifat-sifat semikonduktor, sebagian besar MOF berbasis Zn lain tidak memiliki sifat-sifat seperti material semikonduktor pada umumnya. Dalam hal ini, MOF yang tidak memiliki sifat-sifat semikonduktor dapat dijadikan sebagai pembawa dari zat yang memiliki aktivitas fotokatalitik. MOF bahkan dapat berfungsi dalam perpindahan muatan dengan mekanisme transfer elektron dari ligan ke kluster sehingga rekombinasi muatan dapat dikurangi [13]. Penggunaan MOF berbasis Zn sebagai zat pembawa untuk zat lain yang memiliki aktivitas fotokatalitik telah banyak diteliti, dengan zat-zat fotoaktif yang dimuat meliputi nanopartikel oksida logam [28], nanopartikel logam [29] dan g-CN [30].

Strategi Sintesis MOF berbasis Zn

Berbagai metode sintesis telah dilakukan dalam sintesis MOF berbasis Zn. Proses sintesis yang tepat dapat menghasilkan MOF dengan morfologi, kristalinitas dan aktivitas fotokatalitik, serta sifat lain yang spesifik untuk kebutuhan tertentu. Beberapa metode sintesis yang umum meliputi solvotermal, kopresipitasi, elektrokimia, dan mekanokimia. Material-material MOF berbasis Zn dan metode sintesisnya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

a. Solvotermal

Metode solvotermal merupakan metode sintesis yang melibatkan pembentukan material dari reaksi garam-garam prekursor dalam suatu pelarut pada suhu dan tekanan tinggi. Metode solvotermal dilakukan dalam autoclave dengan liner polytetrafluoroethylene (PTFE) [31]. Suhu pada sintesis solvotermal berada di atas titik didih pelarut. Kelebihan dari metode ini adalah rendemen sintesis yang tinggi, serta kontrol yang presisi terhadap kristalinitas, bentuk, dan ukuran kristalit [32]. Kelemahan dari metode sintesis ini adalah waktu sintesis yang lama, yaitu dalam jangka waktu beberapa jam hingga berhari-hari [33]. Penelitian-penelitian yang melakukan sintesis MOF berbasis Zn dirangkum pada **Tabel.2**.

b. Sintesis kopresipitasi suhu ruang

Sintesis ini mirip dengan teknik solvotermal, namun tanpa pemanasan dan tekanan tinggi. Reaksi dalam pelarut terjadi pada suhu ruang dan kondisi ringan. Agen deprotonasi berupa basa sering digunakan untuk menginisiasi deprotonasi, yang selanjutnya *linker* terdeprotonasi akan membentuk struktur MOF. MOF akan dihasilkan sebagai endapan (presipitat). Kelebihan dari metode ini adalah penggunaan energi yang lebih efisien, dan proses yang sederhana [33].

c. Sintesis terbantu gelombang mikro

Sintesis terbantu gelombang mikro merupakan metode sintesis yang melibatkan reaksi dalam chamber tertutup, serta memanfaatkan radiasi gelombang mikro sebagai sumber panas. Dalam metode ini, reaktan dimasukkan ke dalam wadah teflon, dan ditempatkan dalam chamber yang diradiasikan dengan gelombang mikro. Kelebihan sintesis terbantu gelombang mikro adalah waktu

sintesis yang lebih cepat jika dibandingkan dengan metode pemanasan solvotermal biasa [34]. Pada **Tabel 2**, waktu sintesis terbantu gelombang mikro berkisar antara 5 menit sampai 30 menit, dibandingkan dengan metode solvotermal yang berkisar beberapa jam hingga berhari-hari

d. Sintesis elektrokimia

Dalam sintesis elektrokimia, MOF akan terdepresiasi pada permukaan elektroda. Sintesis elektrokimia memiliki kelebihan dalam waktu yang cepat dan reaksi yang memerlukan kondisi ringan jika dibandingkan dengan solvotermal dan sintesis terbantu gelombang mikro[35]. Beberapa penelitian yang melakukan sintesis MOF berbasis Zn ditampilkan pada Tabel 2.

e. Sintesis mekanokimia

Metode mekanokimia dapat menghasilkan produk secara cepat, dan menggunakan sedikit pelarut atau tanpa pelarut. Kelebihan dari metode sintesis mekanokimia adalah tidak menggunakan pelarut sehingga dapat mengurangi dampak negatif ke lingkungan, waktu sintesis yang cepat, serta memungkinkan untuk membentuk material melalui jalur yang sulit dicapai dari metode sintesis lain. Metode ini memiliki tantangan untuk memperbesar skala reaksi sintesis MOF [36].

Tabel 2. Metode Sintesis MOF Berbasis Zn dan Parameter-Parameter Sintesis Metode Solvotermal

MOF	Prekursor Zn	Pelarut	Kondisi Reaksi		Ref.
			Suhu	Waktu	
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	135°C	24 jam	[37]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	140°C	24 jam	[38]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	130°C	19 jam	[39]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	150°C	6 jam	[40]
MOF-5	Zn(CH ₃ COO) ₂	DMF	125 °C	24 jam	[41]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	130°C	4 jam	[42]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	110 °C	24 jam	[43]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	120 °C	25 jam	[44]
ZIF-8	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	140 °C	14 jam	[45]
ZIF-4	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	150 °C	72 jam	[46]
ZIF-8	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	180 °C	6 jam	[47]
Zn-5-amino-1H-tetrazol	Zn(CH ₃ COO) ₂ ·2H ₂ O	Metanol-asetonitril-air	80-100°C	4-12 jam	[48]
Metode Kopresipitasi Suhu Ruang					
MOF	Prekursor Zn	Pelarut	Agen Deprotonasi	Waktu reaksi	Ref.
MOF-5	Zn(CH ₃ COO) ₂ ·2H ₂ O	DMF	TEA	150 jam	[49]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	NaOH	24 jam	[50]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	TEA	120 menit	[51]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	TEA	120 menit	[52]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	TEA	60 menit	[53]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	TEA	45 menit	[54]
MOF-5	Zn(CH ₃ COO) ₂ ·2H ₂ O	DMF	TEA	150 menit	[55]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	TEA	180 menit	[56]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	TEA	Beberapa menit	[57]
MOF-5	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	DMF	triethanolamin	90 menit	[58]
MOF-5	Zn(CH ₃ COO) ₂ ·2H ₂ O	DMF	TEA	150 menit	[59]

ZIF-93	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Air	NH_4OH	18 jam	[60]
ZIF-7	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Air	NH_3 pekat	10 menit	[61]
ZIF-8	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Methanol	-	60 menit	[62]
ZIF-8	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Air	NaOH	60 menit	[63]

Metode Sintesis Terbantu Gelombang Mikro (*Microwave Assisted Synthesis*)

MOF	Prekursor Zn	Pelarut	Waktu reaksi	Ref.
ZIF-8	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	DMF	5 menit	[64]
Zn-Asam tereftalat (TPA)	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	Air	30 menit	[65]
MOF-205	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	DEF	20 menit	[66]
ZIF-8	ZnO	Air, Air-DMF, Air-metanol	30 menit	[67]

Metode Sintesis Elektrokimia

MOF	Prekursor Zn	Pelarut	Waktu	Ref.
Zn-TPA	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	DMF-metanol	20 menit	[68]
Zn-asam 1,3,5-benzenatrikarboksilat (H_3BTC)	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Air-etanol	150 menit	[69]

Metode Sintesis Mekanokimia

MOF	Prekursor	Volume reaktor	Kecepatan rotasi/vibrasi	Ukuran ball mill	Waktu	Ref.
ZIF-8	$\text{ZnO}; \text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ 2-metilimidazol	10 mL	30 Hz	10 mm	30 menit	[70]
ZIF-90	$\text{ZnO}; \text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ 2-imidazol karbaldehida	10 mL	30 Hz	10 mm	30 menit	[70]
ZIF-94	$\text{ZnO}; \text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ 4-metil-1H-imidazol-5-karbaldehida	25 mL	20 Hz	15 mm	45 menit	[70]
ZIF-7	$\text{ZnO}; \text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ benzilimidazol	10 mL	30 Hz	10 mm	15 menit	[70]
MOF-74	$\text{ZnO};$ asam 2,5-dihidroksitereftalat (H_4HDTA)	25 mL	30 Hz	7 gram	70 menit	[70]
MOF-5	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ Asam tereftalat	80 mL	1000 rpm	10 mm	60 menit	[71]
MOF-5	$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O};$ Asam tereftalat	80 mL		10 mm	60 menit	[72]

Strategi sintesis untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik

a. Doping dengan logam atau nonlogam

Logam yang didoping pada MOF dapat mendukung penyerapan cahaya oleh MOF serta mempengaruhi mobilitas muatan [73]. *Doping* ion logam pada MOF yang memiliki aktivitas penyerapan cahaya terbatas dapat menurunkan *band-gap* dari MOF [74]. Contoh dari strategi sintesis ini telah dilakukan dengan doping Ag pada permukaan ZIF-8 yang meningkatkan aktifitas fotokatalitik terhadap degradasi Methyl orange dan Methylene Blue dibandingkan dengan ZIF-8 saja [75].

b. Pembuatan Komposit MOF dengan Semikonduktor.

Komposit MOF dengan semikonduktor dapat meningkatkan fotosensitivitas dari MOF. Dalam kasus ini, MOF dapat berperan dalam proses adsorpsi polutan yang selanjutnya akan mendukung proses fotokatalisis [74]. MOF juga mendukung proses pemisahan muatan yang lebih efisien dari material sehingga rekombinasi muatan dapat dikurangi secara signifikan [13]. Contoh dari komposit ini adalah ZIF-8@TiO₂ yang memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi terhadap tetrakisiklin daripada TiO₂.

c. Modifikasi Pasca-Sintesis (*Post-Synthetic Modification*)

Post-Synthetic Modification pada MOF dapat dilakukan dengan merekayasa logam atau ligan pada suatu MOF sehingga memiliki sebuah fungsionalitas yang diharapkan. Contoh *Post-Synthetic Modification* adalah pertukaran logam, pertukaran ligan atau penambahan sebuah gugus fungsi pada *linker* MOF [76]. Contoh dari strategi ini adalah pembentukan gugus imina terminal pada ZIF-8 dengan menyinari sinar UV, yang menyebabkan serapan oleh MOF terjadi pada rentang cahaya tampak [77].

Berbagai Polutan Organik yang didegradasi dengan material MOF berbasis Zn

Penelitian-penelitian yang memanfaatkan MOF berbasis Zn untuk degradasi fotokatalitik polutan organik mencakup zat warna (*dye*), obat-obatan dan pestisida. Pewarna organik merupakan jenis polutan organik yang paling banyak didegradasi dengan katalis MOF berbasis Zn. Penelitian tentang degradasi obat-obatan juga dilakukan secara ekstensif karena efek khusus yang ditimbulkan. Obat-obatan yang berada pada lingkungan dapat memiliki efek toksik kepada organisme non target serta menyebabkan resistensi pada mikroba di perairan, terutama untuk obat-obatan antibiotik. Selain zat pewarna dan obat-obatan, Pestisida merupakan jenis polutan yang perlu ditangani secara serius karena memiliki ketahanan dan efek toksik yang tinggi diantara polutan organik lainnya. Penelitian-penelitian yang memanfaatkan MOF berbasis Zn untuk degradasi fotokatalitik ditampilkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Jenis MOF dan aplikasinya dalam degradasi berbagai macampolutan organik

Zat Pewarna				
MOF	Zat pewarna	Waktu	Efisiensi Degradasi	Ref.
ZIF-8	KN-B	120 menit	95%	[78]
ZIF-8/BiFeO ₃	Rhodamine-B	90 menit	99,42%	[79]
Ag ₂ CO ₃ /ZIF-8	Rhodamine-B	50 menit	100%	[80]
Nanopartikel Ag@ZIF-8	Methylene Blue dan Congo Red	120 menit dan 40 menit	97,25% dan 100%	[81]
MoSe@ZIF-8	Malachite Green	60 menit	100%	[82]
TiO ₂ @ZIF-8	Methylene Blue dan Rhodamine B	120 menit	87,5% dan 64,85%	[83]
CuO-ZnO/ZIF-8	Acid Orange 7	100 menit	98,1%	[84]
Zn ₂ (NH ₂ -Asam tereftalat) ₂ (H ₂ O)	Methyl Violet	40 menit	67,31%	[85]
MOF—5	Methylene Blue	24 jam	85%	[86]
MOF-5/Graphene Oxide	Methylene Blue	390 menit	92%	[87]
ZnO@MOF-5	Methylene Blue	210 menit	75,75%	[88]
MOF-5/Bi ₂ WO ₆	Rhodamine-B	30 menit	99,31%	[89]
Obat-obatan				
MOF	Obat-obatan	Waktu	Efisiensi Degradasi	Ref.

MoS ₂ /ZIF-8	Ciprofloxacin dan tetracycline hydrochloride	180 menit	93,2% dan 75,6%	[90]
ZIF-8@ZIF-67	Ciprofloxacin, levofloxacin, dan ofloxacin	120 menit	65%, 54%, dan 48%	[91]
Ag/ZIF-8	Ciprofloxacin	90 menit	82,3%	[92]
γ -Fe ₂ O ₃ @ SiO ₂ @ZIF8-Ag	amoxicillin	60 menit	100%	[93]
Gd@Zn-MOF	Nitrofurantoin	120 menit	92,15%	[94]
Ag ₂ S-ZnS/ZIF-8	Tetracycline	10 menit	92,74%	[95]
[Zn(meso-{5,10,15,20-tetrakis(4-cyanophenyl)porphyrin})(H ₂ O)].3DMF	Tetracycline	50 menit	95,5%	[96]
[Zn(tereftalat)(2,5-bis(pyrid-4-yl)pyridine)·3H ₂ O]	Nitrofurazone	60 menit	95,27%	[97]
Pestisida				
MOF	Pestisida	Waktu	Efisiensi Degradasi	Ref.
Fe ₃ O ₄ -COOH@ZIF-8/Ag/Ag ₃ PO ₄	Diazinon	55 menit	63,4%	[98]
CNC/ZIF-8/Ag	Diquat	60 menit	95,62%	[99]
TiO ₂ /ZIF-8	Imidacloprid	240 menit	91,6%	[100]

Tantangan Pemanfaatan Mof Berbasis Zn dalam Degradasi Polutan Organik

Tantangan utama dalam pemanfaatan MOF sebagai fotokatalisis adalah kestabilan pada lingkungan. Beberapa MOF seperti ZIF-8 dan MOF-5 memiliki Beberapa MOF-5 memiliki ketidakstabilan pada kelembapan, karena dapat memicu degradasi hidrolitik yang selanjutnya merusak struktur kerangka MOF [101]. MOF berbasis Zn yang berkoordinasi melalui gugus karboksilat lebih rentan terhadap degradasi daripada MOF dari kelompok ZIF yang terikat melalui gugus azolat [12]. Disisi lain, MOF berbasis Zn umumnya tidak memiliki aktivitas semikonduktor yang baik [13].

Untuk mengatasi hal-hal tersebut, strategi dalam mendesain ataupun meningkatkan efektivitas harus mempertimbangkan gugus fungsi yang sesuai untuk mempertahankan kestabilan MOF berbasis Zn , serta mengkombinasikan MOF berbasis Zn dengan strategi doping atau komposit untuk meningkatkan sensitivitas terhadap cahaya dan meningkatkan ketahanannya pada lingkungan.

KESIMPULAN

MOF berbasis Zn memiliki potensi dalam degradasi fotokatalitik polutan organik.. MOF dapat menjadi fotokatalis atau berperan sebagai pembawa dari zat fotoaktif. MOF berbasis Zn dapat disintesis dengan metode solvothermal, kopresipitasi suhu ruang, sintesis terbantu gelombang mikro, sintesis elektrokimia, dan mekanokimiak. Untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dari MOF berbasis Zn,dapat dilakukan dengan doping, pembuatan komposit, serta modifikasi pasca sintesis. Adapun tantangan dalam penggunaan MOF berbasis Zn adalah kestabilan yang rendah dan aktivitas fotokatalitik yang terbatas, sehingga strategi sintesis untuk meningkatkan kestabilan dan aktivitas perlu dikaji secara mendalam untuk sintesis material MOF berbasis Zn.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Oginawati K., Kahfa A.N. & Susetyo S.H. (2023). The effects of the use of organochlorine and organophosphate pesticides in agriculture and households on water and sediment pollution in the Cikeruh River, Indonesia. *International Journal of River Basin Management*. 21(4), 651-657. doi:10.1080/15715124.2022.2079654
- [2] Adyasari D., Pratama M.A., Teguh N.A., Sabdaningsih A., Kusumaningtyas M.A. & Dimova N. (2021). Anthropogenic impact on Indonesian coastal water and ecosystems: Current status and future opportunities. *Marine Pollution Bulletin*. 171(2021), 1-14. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112689
- [3] Kusumandari K., Saraswati T.E., Wulandari S.W. & Qusnudin A. (2022). Atmospheric air plasma corona discharge for dye degradation of Indonesian batik wastewater. *Indian Journal of Physics*. 96(4), 1001-1008. doi:10.1007/s12648-021-02082-5
- [4] Dsikowitzky L., Crawford S.E., Nordhaus I., et al. (2020). Analysis and environmental risk assessment of priority and emerging organic pollutants in sediments from the tropical coastal megacity Jakarta, Indonesia. *Regional Studies in Marine Science*. 34, 1-10. doi:10.1016/j.rsma.2019.101021
- [5] Hidayati N.V., Syakti A.D., Nuning V., et al. (2021). Ecological risk assessment of persistent organic pollutants (POPs) in surface sediments from aquaculture system Ecological risk assessment of persistent organic pollutants (POPs) in surface sediments from aquaculture system Ecological risk assessment of persistent organic pollutants (POPs) in surface sediments from aquaculture system. *Chemosphere*. 263, 128372-128384. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128372
- [6] Mohamadpour F. & Amani A.M. (2024). Photocatalytic systems: reactions, mechanism, and applications. *RSC Advances*. 14(29), 20609-20645. doi:10.1039/d4ra03259d
- [7] Velepini T., Prabakaran E. & Pillay K. (2021). Recent developments in the use of metal oxides for photocatalytic degradation of pharmaceutical pollutants in water—a review. *Materials Today Chemistry*. 19, 100380-100401. doi:10.1016/j.mtchem.2020.100380
- [8] Hernández-Alonso M.D., Fresno F., Suárez S. & Coronado J.M. (2009). Development of alternative photocatalysts to TiO₂: Challenges and opportunities. *Energy and Environmental Science*. 2(12), 1231-1257. doi:10.1039/b907933e
- [9] Bhuyan A. & Ahmaruzzaman Md. (2024). Recent advances in MOF-5-based photocatalysts for efficient degradation of toxic organic dyes in aqueous medium. *Next Sustainability*. 3, 1-12. doi:10.1016/j.nxsust.2023.100016
- [10] Younis S.A., Kwon E.E., Qasim M., et al. (2020). Metal-organic framework as a photocatalyst: Progress in modulation strategies and environmental/energy applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 81, 100870-100918. doi:10.1016/j.pecs.2020.100870
- [11] Shahnawaz Khan M., Khalid M. & Shahid M. (2020). What triggers dye adsorption by metal organic frameworks? The current perspectives. *Materials Advances*. 1(6), 1575-1601. doi:10.1039/d0ma00291g
- [12] Wang Q., Gao Q., Al-Enizi A.M., Nafady A. & Ma S. (2020). Recent advances in MOF-based photocatalysis: Environmental remediation under visible light. *Inorganic Chemistry Frontiers*. 7(2), 300-339. doi:10.1039/c9qi01120j
- [13] Nasalevich M.A., Van Der Veen M., Kapteijn F. & Gascon J. (2014). Metal-organic frameworks as heterogeneous photocatalysts: Advantages and challenges. *CrystEngComm*. 16(23), 4919-4926. doi:10.1039/c4ce00032c
- [14] Moharramnejad M., Ehsani A., salmani S., et al. (2022). Zinc-based metal-organic frameworks: synthesis and recent progress in biomedical application. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 32, 3339-3354. doi:10.1007/s10904-022-02385-y

- [15] Wąty J., Potocki S. & Rowińska-Żyrek M. (2016). Zinc Homeostasis at the Bacteria/Host Interface—From Coordination Chemistry to Nutritional Immunity. *Chemistry - A European Journal*. 22(45), 15992-16010. doi:10.1002/chem.201602376
- [16] Kalmutzki M.J., Hanikel N. & Yaghi O.M. (2018). Secondary building units as the turning point in the development of the reticular chemistry of MOFs. *Sci Adv*. 4(10), 1-16. doi:10.1126/sciadv.aat9180
- [17] Kamal Kandezi M., Sokhanvaran V., Ahadi Z., et al. (2023). Hydrogen adsorption on methyl-functionalized IRMOF-1 and IRMOF-18 by molecular simulation. *Theoretical Chemistry Accounts*. 142(2), 1-15. doi:10.1007/s00214-023-02954-5
- [18] Kouser S., Hezam A., Khadri M.J.N. & Khanum S.A. (2022). A review on zeolite imidazole frameworks: synthesis, properties, and applications. *Journal of Porous Materials*. 29(3), 663-681. doi:10.1007/s10934-021-01184-z
- [19] Földes D., Kováts É., Bortel G., Jakab E. & Pekker S. (2019). A metal-organic framework with paddle-wheel Zn₂(CO₂)₄ secondary building units and cubane-1,4-dicarboxylic acid linkers. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 63(3), 365-369. doi:10.3311/PPch.13075
- [20] Gao F.X., Ye Y.J., Zhao L.T., Liu D.H. & Li Y. (2018). A porous Zn-based metal-organic framework with an expanded tricarboxylic acid ligand for effective CO₂ capture and CO₂/CH₄ separation. *Inorganic Chemistry Communications*. 94, 39-42. doi:10.1016/j.inoche.2018.05.031
- [21] Schoedel A. & Rajeh S. (2020). Why Design Matters: From Decorated Metal Oxide Clusters to Functional Metal–Organic Frameworks. *Topics in Current Chemistry*. 378, 1-55. doi:10.1007/s41061-020-0281-0
- [22] Gan Y. Le, Huang K.R., Li Y.G., et al. (2021). Synthesis, structure and fluorescent sensing for nitrobenzene of a Zn-based MOF. *Journal of Molecular Structure*. 1223, 1-6. doi:10.1016/j.molstruc.2020.129217
- [23] Eskemech A., Chand H., Karmakar A., Krishnan V. & Koner R.R. (2024). Zn-MOF as a Single Catalyst with Dual Lewis Acidic and Basic Reaction Sites for CO₂ Fixation. *Inorganic Chemistry*. 63(8), 3757-3768. doi:10.1021/acs.inorgchem.3c03901
- [24] Xue X., Liu Y., Liu Q., Wang X., Li W. & Peng J. (2018). A New Metal–Organic Framework with Pentanuclear Zinc Clusters as Secondary Building Units. *Journal of Cluster Science*. 29(4), 625-632. doi:10.1007/s10876-018-1377-3
- [25] Menzel S., Heinen T., Boldog I., et al. (2022). Metal-organic framework structures of fused hexagonal motifs with cuprophilic interactions of a triangular Cu(i)3(pyrazolate-benzoate) metallo-linker. *CrystEngComm*. 24(20), 3675-3691. doi:10.1039/d2ce00268j
- [26] Zhang X., Wang J., Dong X.X. & Lv Y.K. (2020). Functionalized metal-organic frameworks for photocatalytic degradation of organic pollutants in environment. *Chemosphere*. 242, 1-56. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125144
- [27] Alvaro M., Carbonell E., Ferrer B., Llabrés I Xamena F.X. & Garcia H. (2007). Semiconductor behavior of a metal-organic framework (MOF). *Chemistry - A European Journal*. 13(18), 5106-5112. doi:10.1002/chem.200601003
- [28] Zhang Q., Wang D., Yu R., et al. (2023). Excellent photocatalytic degradation of rhodamine B over Bi₂O₃ supported on Zn-MOF nanocomposites under visible light. *Green Processing and Synthesis*. 12(1), 1-10. doi:10.1515/gps-2022-8123
- [29] Bagheri N., Khataee A., Habibi B. & Hassanzadeh J. (2018). Mimetic Ag nanoparticle/Zn-based MOF nanocomposite (AgNPs@ZnMOF) capped with molecularly imprinted polymer for the selective detection of patulin. *Talanta*. 179, 710-718. doi:10.1016/j.talanta.2017.12.009
- [30] Yuan X., Qu S., Huang X., et al. (2021). Design of core-shelled g-C₃N₄@ZIF-8 photocatalyst with enhanced tetracycline adsorption for boosting photocatalytic degradation. *Chemical Engineering Journal*. 416, 1-13. doi:10.1016/j.cej.2021.129148

- [31] Imanipoor J., Mohammadi M., Dinari M. & Ehsani M.R. (2021). Adsorption and Desorption of Amoxicillin Antibiotic from Water Matrices Using an Effective and Recyclable MIL-53(Al) Metal-Organic Framework Adsorbent. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 66(1), 389-403. doi:10.1021/acs.jced.0c00736
- [32] Remya V.R. & Kurian M. (2019). Synthesis and catalytic applications of metal–organic frameworks: a review on recent literature. *International Nano Letters*. 9(1), 17-29. doi:10.1007/s40089-018-0255-1
- [33] Li D., Yadav A., Zhou H., Roy K., Thanasekaran P. & Lee C. (2024). Advances and Applications of Metal-Organic Frameworks (MOFs) in Emerging Technologies: A Comprehensive Review. *Global Challenges*. 8(2), 1-32. doi:10.1002/gch2.202300244
- [34] Thomas-Hillman I., Laybourn A., Dodds C. & Kingman S.W. (2018). Realising the environmental benefits of metal-organic frameworks: Recent advances in microwave synthesis. *Journal of Materials Chemistry A*. 6(25), 11564-11581. doi:10.1039/c8ta02919a
- [35] Al-Kutubi H., Gascon J., Sudhölter E.J.R. & Rassaei L. (2015). Electrosynthesis of Metal-Organic Frameworks: Challenges and Opportunities. *ChemElectroChem*. 2(4), 462-474. doi:10.1002/celec.201402429
- [36] Wang W., Chai M., Bin Zulkifli M.Y., et al. (2022). Metal-organic framework composites from a mechanochemical process. *Molecular Systems Design and Engineering*. 8(5), 560-579. doi:10.1039/d2me00211f
- [37] Mohammadi A.A., Moghanlo S., Kazemi M.S., et al. (2022). Comparative removal of hazardous cationic dyes by MOF-5 and modified graphene oxide. *Scientific Reports*. 12(1), 1-12. doi:10.1038/s41598-022-19550-5
- [38] Asadevi H., Prasannakumaran Nair Chandrika Kumari P., Padmavati Amma R., Khadar S.A., Charivumvasathu Sasi S. & Raghunandan R. (2022). ZnO@MOF-5 as a Fluorescence “Turn-Off” Sensor for Ultrasensitive Detection as well as Probing of Copper(II) Ions. *ACS Omega*. 7(15), 13031-13041. doi:10.1021/acsomega.2c00416
- [39] Shin S., Yoon H., Yoon Y., Park S. & Shin M.W. (2021). Porosity tailoring of the Zn-MOF-5 derived carbon materials and its effects on the performance as a cathode for lithium-air batteries. *Microporous and Mesoporous Materials*. 311(August 2020), 1-7. doi:10.1016/j.micromeso.2020.110726
- [40] Qin X., Qiang T., Chen L. & Wang S. (2021). Construction of 3D N-CQD/MOF-5 photocatalyst to improve the photocatalytic performance of MOF-5 by changing the electron transfer path. *Microporous and Mesoporous Materials*. 315, 1-10. doi:10.1016/j.micromeso.2021.110889
- [41] Kumar G. & Masram D.T. (2021). Sustainable Synthesis of MOF-5@GO Nanocomposites for Efficient Removal of Rhodamine B from Water. *ACS Omega*. 6(14), 9587-9599. doi:10.1021/acsomega.1c00143
- [42] Hu Y., Yang H., Wang R. & Duan M. (2021). Fabricating Ag@MOF-5 nanoplates by the template of MOF-5 and evaluating its antibacterial activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 626, 1-6. doi:10.1016/j.colsurfa.2021.127093
- [43] Shiri M., Hosseinzadeh M., Shiri S. & Javanshir S. (2024). Adsorbent based on MOF-5/cellulose aerogel composite for adsorption of organic dyes from wastewater. *Scientific Reports*. 14(1), 1-13. doi:10.1038/s41598-024-65774-y
- [44] Mosavi S.H., Zare-Dorabei R. & Bereyhi M. (2021). Rapid and Effective Ultrasonic-Assisted Adsorptive Removal of Congo Red onto MOF-5 Modified by CuCl₂ in Ambient Conditions: Adsorption Isotherms and Kinetics Studies. *ChemistrySelect*. 6(18), 4432-4439. doi:10.1002/slct.202100540
- [45] Chen Y. & Tang S. (2019). Solvothermal synthesis of porous hydrangea-like zeolitic imidazole framework-8 (ZIF-8) crystals. *Journal of Solid State Chemistry*. 276, 68-74. doi:10.1016/j.jssc.2019.04.034

- [46] Zhang J., Qiao A., Tao H. & Yue Y. (2019). Synthesis, phase transitions and vitrification of the zeolitic imidazolate framework: ZIF-4. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 525, 1-5. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2019.119665
- [47] Alnafisah M.S., Alharbi K.N., Almuqati N.S., et al. (2025). Effect of solvent selection on Zn-MOFs synthesized for hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 120, 393-402. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.03.326
- [48] Zhang Y., Kang X., Guo P., Tan H. & Zhang S.H. (2022). Studies on the removal of phosphate in water through adsorption using a novel Zn-MOF and its derived materials. *Arabian Journal of Chemistry*. 15(8), 1-12. doi:10.1016/j.arabjc.2022.103955
- [49] Naimi Joubani M., Zanjanchi M.A. & Sohrabnezhad S. (2020). A novel Ag/Ag₃PO₄-IRMOF-1 nanocomposite for antibacterial application in the dark and under visible light irradiation. *Applied Organometallic Chemistry*. 34(5), 1-14. doi:10.1002/aoc.5575
- [50] Sánchez-Sánchez M., Getachew N., Díaz K., Díaz-García M., Chebude Y. & Díaz I. (2015). Synthesis of metal-organic frameworks in water at room temperature: Salts as linker sources. *Green Chemistry*. 17(3), 1500-1509. doi:10.1039/c4gc01861c
- [51] Saeed-Ul-Hassan M., Ehtisham M., Badawi A.K., Khan A.M., Khan R.A. & Ismail B. (2024). A comparative study of moisture adsorption on GO, MOF-5, and GO/MOF-5 composite for applications in atmospheric water harvesting. *Nanoscale Advances*. 6(14), 3668-3679. doi:10.1039/d4na00150h
- [52] Vali S.A., Moral-Vico J., Font X. & Sánchez A. (2024). Cu/ZnO/CeO₂ Supported on MOF-5 as a Novel Catalyst for the CO₂ Hydrogenation to Methanol: A Mechanistic Study on the Effect of CeO₂ and MOF-5 on Active Sites. *Catalysis Letters*. 154(7), 3157-3173. doi:10.1007/s10562-023-04554-1
- [53] Jutrzenka Trzebiatowska P., Maramorosz Z., Baluk M.A., Gazda M., Ecieza A. & Zaleska-Medynska A. (2024). The catalytic activity of metal-organic frameworks (MOFs) and post-synthetic modified MOF towards depolymerisation of polycarbonate. *Applied Surface Science*. 673, 1-10. doi:10.1016/j.apsusc.2024.160894
- [54] Babapour M., Hadi Dehghani M., Alimohammadi M., et al. (2022). Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution using mesoporous metal-organic framework-5 functionalized with the amino acids: Characterization, optimization, linear and nonlinear kinetic models. *Journal of Molecular Liquids*. 345, 1-15. doi:10.1016/j.molliq.2021.117835
- [55] Bouider B., Haffad S., Bouakaz B.S., Berd M., Ouhnia S. & Habi A. (2023). MOF-5/Graphene Oxide Composite Photocatalyst for Enhanced Photocatalytic Activity of Methylene Blue Degradation Under Solar Light. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 33(12), 4001-4011. doi:10.1007/s10904-023-02668-y
- [56] Liu Y., Fan J., He F., et al. (2021). Glycosyl/MOF-5-based carbon nanofibers for highly sensitive detection of anti-bacterial drug quercetin. *Surfaces and Interfaces*. 27(May), 1-7. doi:10.1016/j.surfin.2021.101488
- [57] Nivetha R., Gothandapani K., Raghavan V., et al. (2021). Nano-MOF-5 (Zn) Derived Porous Carbon as Support Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Reaction. *ChemCatChem*. 13(20), 4342-4349. doi:10.1002/cctc.202100958
- [58] Madhu R., Sankar S.S., Karthick K., Karmakar A., Kumaravel S. & Kundu S. (2021). Electrospun Cobalt-Incorporated MOF-5 Microfibers as a Promising Electrocatalyst for OER in Alkaline Media. *Inorganic Chemistry*. 60(13), 9899-9911. doi:10.1021/acs.inorgchem.1c01151
- [59] Baxter S.J., Burtch N.C., Evans J.D., Ready A.D., Wilkinson A.P. & Schneemann A. (2022). Recovery of MOF-5 from Extreme High-Pressure Conditions Facilitated by a Modern Pressure Transmitting Medium. *Chemistry of Materials*. 34(2), 768-776. doi:10.1021/acs.chemmater.1c03613

- [60] Ramos-Fernandez E. V., Grau-Atienza A., Farrusseng D. & Aguado S. (2018). A water-based room temperature synthesis of ZIF-93 for CO₂ adsorption. *Journal of Materials Chemistry A*. 6(14), 5598-5602. doi:10.1039/c7ta09807c
- [61] Ebrahimi M. & Mansournia M. (2017). Rapid room temperature synthesis of zeolitic imidazolate framework-7 (ZIF-7) microcrystals. *Materials Letters*. 189, 243-247. doi:10.1016/j.matlet.2016.12.025
- [62] Tsai C.W. & Langner E.H.G. (2016). The effect of synthesis temperature on the particle size of nano-ZIF-8. *Microporous and Mesoporous Materials*. 221, 8-13. doi:10.1016/j.micromeso.2015.08.041
- [63] Abdelhamid H.N. & Zou X. (2018). Template-free and room temperature synthesis of hierarchical porous zeolitic imidazolate framework nanoparticles and their dye and CO₂ sorption. *Green Chemistry*. 20(5), 1074-1084. doi:10.1039/c7gc03805d
- [64] Zhang P., Xiao Y., Sun H., et al. (2018). Microwave-Assisted, Ni-Induced Fabrication of Hollow ZIF-8 Nanoframes for the Knoevenagel Reaction. *Crystal Growth and Design*. 18(7), 3841-3850. doi:10.1021/acs.cgd.8b00045
- [65] Hirai Y., Furukawa K., Sun H., et al. (2018). Microwave-assisted hydrothermal synthesis of ZnO and Zn-terephthalate hybrid nanoparticles employing benzene dicarboxylic acids. *Microsystem Technologies*. 24(1), 699-708. doi:10.1007/s00542-017-3392-y
- [66] Babu R., Roshan R., Kathalikkattil A.C., Kim D.W. & Park D.W. (2016). Rapid, Microwave-Assisted Synthesis of Cubic, Three-Dimensional, Highly Porous MOF-205 for Room Temperature CO₂ Fixation via Cyclic Carbonate Synthesis. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 8(49), 33723-33731. doi:10.1021/acsami.6b12458
- [67] Bazzi L., Ayouch I., Tachallait H. & EL Hankari S. (2022). Ultrasound and microwave assisted-synthesis of ZIF-8 from zinc oxide for the adsorption of phosphate. *Results in Engineering*. 13, 1-10. doi:10.1016/j.rineng.2022.100378
- [68] Salehi S., Aghazadeh M. & Karimzadeh I. (2022). Zn-MOF electrode material for supercapacitor applications. *Physics of Applied Materials*. 2, 77-81. doi:10.22075/ppam.2022.28846.1036
- [69] De Lima Neto O.J., Frós A.C. de O., Barros B.S., De Farias Monteiro A.F. & Kulesza J. (2019). Rapid and efficient electrochemical synthesis of a zinc-based nano-MOF for Ibuprofen adsorption. *New Journal of Chemistry*. 43(14), 5518-5524. doi:10.1039/C8NJ06420B
- [70] Škrjanc A., Golobič A., Mazaj M., Huš M., Likozar B. & Logar N.Z. (2025). Green synthesis of functionalized sodalite ZIFs through mechanochemistry and their performance in CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*. 384, 1-11. doi:10.1016/j.micromeso.2024.113453
- [71] Zhu Z.W. & Zheng Q.R. (2023). Investigation of cryo-adsorption hydrogen storage capacity of rapidly synthesized MOF-5 by mechanochemical method. *International Journal of Hydrogen Energy*. 48(13), 5166-5174. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.026
- [72] Lv D., Chen Y., Li Y., et al. (2017). Efficient Mechanochemical Synthesis of MOF-5 for Linear Alkanes Adsorption. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 62(7), 2030-2036. doi:10.1021/acs.jced.7b00049
- [73] Dhakshinamoorthy A., Li Z. & Garcia H. (2018). Catalysis and photocatalysis by metal organic frameworks. *Chemical Society Reviews*. 47(22), 8134-8172. doi:10.1039/c8cs00256h
- [74] Khan M.S., Li Y., Li D.S., Qiu J., Xu X. & Yang H.Y. (2023). A review of metal-organic framework (MOF) materials as an effective photocatalyst for degradation of organic pollutants. *Nanoscale Advances*. 5(23), 6318-6348. doi:10.1039/d3na00627a
- [75] Abdi J. (2020). Synthesis of Ag-doped ZIF-8 photocatalyst with excellent performance for dye degradation and antibacterial activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 604, 1-35. doi:10.1016/j.colsurfa.2020.125330

- [76] Mandal S., Natarajan S., Mani P. & Pankajakshan A. (2021). Post-Synthetic Modification of Metal–Organic Frameworks Toward Applications. *Advanced Functional Materials*. 31(4), 1-22. doi:10.1002/adfm.202006291
- [77] Papurello R.L., Lozano L.A., Ramos-Fernández E. V., Fernández J.L. & Zamaro J.M. (2019). Post-Synthetic Modification of ZIF-8 Crystals and Films through UV Light Photoirradiation: Impact on the Physicochemical Behavior of the MOF. *ChemPhysChem*. 20(23), 3201-3209. doi:10.1002/cphc.201900863
- [78] Trung L.G., Nguyen M.K., Hang Nguyen T.D., Tran V.A., Gwag J.S. & Tran N.T. (2023). Highly efficient degradation of reactive black KN-B dye by ultraviolet light responsive ZIF-8 photocatalysts with different morphologies. *RSC Advances*. 13(9), 5908-5924. doi:10.1039/d2ra08312d
- [79] Bethi B., Radhika G.B., Thang L.M., Sonawane S.H. & Boczkaj G. (2023). Photocatalytic decolourization of Rhodamine-B dye by visible light active ZIF-8/BiFeO₃ composite. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(10), 25532-25545. doi:10.1007/s11356-022-20165-6
- [80] Wang L., Wang J., Tang M., Wang C., Gao D. & Zhou Y. (2023). Developing a Z-scheme Ag₂CO₃/ZIF-8 heterojunction for the surface decoration of cotton fabric toward repeatable photocatalytic dye degradation. *Applied Surface Science*. 610, 1-10. doi:10.1016/j.apsusc.2022.155605
- [81] Chandra R. & Nath M. (2020). Controlled synthesis of AgNPs@ZIF-8 composite: Efficient heterogeneous photocatalyst for degradation of methylene blue and congo red. *Journal of Water Process Engineering*. 36, 1-9. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101266
- [82] Mittal H., Ivaturi A. & Khanuja M. (2023). MoSe₂-modified ZIF-8 novel nanocomposite for photocatalytic remediation of textile dye and antibiotic-contaminated wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(2), 4151-4165. doi:10.1007/s11356-022-22487-x
- [83] Chandra R., Mukhopadhyay S. & Nath M. (2016). TiO₂@ZIF-8: A novel approach of modifying micro-environment for enhanced photo-catalytic dye degradation and high usability of TiO₂ nanoparticles. *Materials Letters*. 164, 571-574. doi:10.1016/j.matlet.2015.11.018
- [84] Abdollahi B., Najafidoust A., Abbasi Asl E. & Sillanpaa M. (2021). Fabrication of ZIF-8 metal organic framework (MOFs)-based CuO-ZnO photocatalyst with enhanced solar-light-driven property for degradation of organic dyes. *Arabian Journal of Chemistry*. 14(12), 1-14. doi:10.1016/j.arabjc.2021.103444
- [85] Hu W., Rao C., Chen C., Liao Z., Srivastava D. & Kumar A. (2021). Zn(II)-MOF with flexible dicarboxylate ligand with different N-donor linkage as photocatalyst for aromatic dye degradation. *Inorganic Chemistry Communications*. 130, 1-6. doi:10.1016/j.inoche.2021.108685
- [86] Gupta H., Saini I., Singh V., Kumar T. & Singh V. (2024). Tailoring MOF-5 Photocatalysts: Low-Temperature Synthesis and Solvent Variations for Enhanced Performance in Dye Degradation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*. 19(1), 1-14. doi:10.9767/bcrec.20062
- [87] Bouider B., Haffad S., Bouakaz B.S., Berd M., Ouhnia S. & Habi A. (2023). MOF-5/Graphene Oxide Composite Photocatalyst for Enhanced Photocatalytic Activity of Methylene Blue Degradation Under Solar Light. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 33(12), 4001-4011. doi:10.1007/s10904-023-02668-y
- [88] Harisankar A., Preethi P.C., Sreeja T.G., Rejani P., Murali M. & Raghunandan R. (2024). Zinc oxide functionalized MOF-5 for the adsorptive removal of Pb(II) metal ions and photocatalytic degradation of methylene blue dye in aqueous medium. *Ionics*. 30(4), 2313-2331. doi:10.1007/s11581-024-05414-7

- [89] Yao T., Tan Y., Zhou Y., Chen Y. & Xiang M. (2022). Preparation of core-shell MOF-5/Bi₂WO₆ composite for the enhanced photocatalytic degradation of pollutants. *Journal of Solid State Chemistry*. 308. doi:10.1016/j.jssc.2022.122882
- [90] [90] Chen W.Q., Li L.Y., Li L., et al. (2019). MoS₂/ZIF-8 Hybrid Materials for Environmental Catalysis: Solar-Driven Antibiotic-Degradation Engineering. *Engineering*. 5(4), 755-767. doi:10.1016/j.eng.2019.02.003
- [91] Sadiq S., Khan I., Humayun M., et al. (2023). Synthesis of Metal-Organic Framework-Based ZIF-8@ZIF-67 Nanocomposites for Antibiotic Decomposition and Antibacterial Activities. *ACS Omega*. 8(51), 49244-49258. doi:10.1021/acsomega.3c07606
- [92] Subhadarshini A., Samal S.K., Pattnaik A. & Nanda B. (2023). Facile fabrication of plasmonic Ag/ZIF-8: an efficient catalyst for investigation of antibacterial, haemolytic and photocatalytic degradation of antibiotics. *RSC Advances*. 13(45), 31756-31771. doi:10.1039/d3ra04851a
- [93] Al-Musawi T.J., Alghamdi M.I., Alhachami F.R., et al. (2023). The application of a new recyclable photocatalyst γ -Fe₂O₃@SiO₂@ZIF8-Ag in the photocatalytic degradation of amoxicillin in aqueous solutions. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195(3), 1-18. doi:10.1007/s10661-023-10974-8
- [94] Shukla V. & Siddiqui K.A. (2024). Dosage Dependent Photocatalytic Degradation of NFT and Other Antibiotics and Energy Storage Application of Unprecedented Gd-doped Zinc-MOF Composite. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 34, 4285-4302. doi:10.1007/s10904-024-03110-7
- [95] Chen Q., Yang X., Fu X., et al. (2024). Fabrication of a novel Ag₂S-ZnS/ZIF-8 hollow heterojunction by in-situ formation of Ag₂S and ZnS on ZIF-8 with enhanced tetracycline degradation performance. *Chemical Engineering Journal*. 499, 1-9. doi:10.1016/j.cej.2024.156242
- [96] Jafarizadeh T., Hayati P., Neyrizi H.Z., et al. (2021). Synthesis and structural characterization of a novel Zn(II) metal organic complex (Zn-MOC) and elimination of highly consumed antibiotic; tetracycline from aqueous solution by their nanostructures photocatalyst under visible light. *Journal of Molecular Structure*. 1228, 1-13. doi:10.1016/j.molstruc.2020.129448
- [97] Zhang J., Zhao T., Kushwaha A., et al. (2025). A new Zn(II)-based 3D MOF with PCU-like topology: Potent photocatalyst for nitrofurazone antibiotic degradation. *Journal of Molecular Structure*. 1320, 1-11. doi:10.1016/j.molstruc.2024.139672
- [98] Naimi Joubani M., Zanjanchi M.A. & Sohrabnezhad S. (2020). The carboxylate magnetic – Zinc based metal-organic framework heterojunction: Fe₃O₄-COOH@ZIF-8/Ag/Ag₃PO₄ for plasmon enhanced visible light Z-scheme photocatalysis. *Advanced Powder Technology*. 31(1), 29-39. doi:10.1016/j.appt.2019.09.034
- [99] Luo K., Chen A., Liu Y., Yang J., Cai N. & Li J. (2025). Constructing a highly sensitive SERS sensor based on necklace-like CNC/ZIF-8/Ag to detect and photo-degrade diquat in green tea leaves. *Industrial Crops and Products*. 225, 1-11. doi:10.1016/j.indcrop.2024.120453
- [100] Bogdan L., Palčić A., Duplančić M., Leskovac M. & Tomašić V. (2023). Eco-Friendly Synthesis of TiO₂/ZIF-8 Composites: Characterization and Application for the Removal of Imidacloprid from Wastewater. *Processes*. 11(3), 1-15. doi:10.3390/pr11030963
- [101] Sher F., Hayward A., El Guerraf A., et al. (2024). Advanced metal-organic frameworks for superior carbon capture, high-performance energy storage and environmental photocatalysis - a critical review. *Journal of Materials Chemistry A*. 12, 27932-27973. doi:10.1039/d4ta03877k