

PENGEMBANGAN KOMPOSIT ZIF-8 DENGAN LOGAM OKSIDA

THE DEVELOPMENT OF ZIF-8 COMPOSITE WITH METAL OXIDE

Adelia Maritza Sardi, Husna Syaima*

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Mulawarman University, Gunung Kelua
Campus, Samarinda 76116 Indonesia

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

ABSTRACT

This review article discusses the effectiveness of composite synthesis methods for ZIF-8 with metal oxides and their applications in various fields. ZIF-8 is a popular metal-organic framework due to its stability; however, it has limitations, such as low conductivity, limited catalytic activity, and poor recyclability. To address these issues, various methods for synthesizing ZIF-8-metal oxide composites have been developed in recent years. These composites demonstrate significant potential to enhance performance in applications like photocatalysis and energy storage, as metal oxide-based materials can provide higher energy density and improved conductivity. This review presents a recent comparison of different synthesis methods to provide further insights into developing these materials for industrial applications.

Keywords : Metal Oxide, ZIF-8, ZIF-8 Composite Synthesis

ABSTRAK

Review artikel ini membahas mengenai efektivitas metode sintesis komposit ZIF-8 dengan logam oksida, serta aplikasinya dalam berbagai bidang. ZIF-8 merupakan Metal-Organic Framework yang populer karena kestabilannya, namun senyawa ini memiliki kekurangan seperti konduktivitas rendah, aktivitas katalitik yang terbatas, dan stabilitas penggunaan ulang yang buruk. Untuk mengatasi hal tersebut, berbagai metode sintesis komposit ZIF-8 dengan logam oksida telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Komposit ZIF-8-logam oksida menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan kinerja aplikasi seperti fotokatalisis dan penyimpanan energi, karena bahan berbasis oksida logam dapat memberikan kepadatan energi yang lebih tinggi serta meningkatkan konduktivitas. Review ini menyajikan perbandingan terbaru dari metode-metode sintesis yang berbeda, guna memberikan wawasan lebih lanjut dalam pengembangan material ini untuk aplikasi industri.

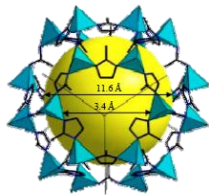
Kata kunci : Logam Oksida, Sintesis Komposit ZIF-8, ZIF-8

PENDAHULUAN

Zeolitic Imidazolate Framework (ZIF) adalah material dengan struktur yang dibuat berdasarkan unit tetrahedral yang setiap ion logam (M) terikat dengan empat penghubung imidazole organik (Im) (M-IM-M), yang dianggap sebagai sub famili MOF serta memiliki topologi yang mirip dengan zeolite [1]. ZIF berpotensi untuk beberapa aplikasi seperti pemisahan gas dengan adsorpsi atau dalam membrane, penginderaan serta katalisis yang merupakan keunggulan dari sifat-sifatnya, termasuk memiliki luas permukaan yang besar, struktur mikroporinya, serta stabilitas kimia dan termalnya [2].

ZIF-8 merupakan material yang memiliki pori dan struktur yang berbentuk sodalit dengan pori 11,6Å, lebar pori 3,4Å dan luas permukaan 1947 m²/g serta volume pori 0,663 cm³/g [3]. ZIF-8 banyak disintesis dengan metode yang ramah lingkungan sehingga ukuran dari ZIF-8 mudah dikendalikan [4]. ZIF-8 merupakan salah satu turunan yang klasik serta populer, karena memiliki keunggulan berupa kestabilan yang memungkinkan penggunaan dalam jangka panjang. Kestabilan ZIF diungkapkan oleh [5] bahwa kristal dari ZIF (ZIF-7, ZIF-8, dan ZIF-93) telah mengalami hidrolisis pada kondisi hidrotermal saat kontak dengan air dengan perbandingan berat ZIF lebih rendah, yang dikaitkan dengan penghilangan efek penghambat

ligan imidazolate. Adapun struktur tiga dimensi dari ZIF-8 dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 1. Struktur tiga dimensi ZIF-8

[2]

ZIF-8 memiliki kelebihan di berbagai aplikasi tetapi tidak menutupi memiliki sifat lemah dari ZIF-8 murni seperti konduktivitas rendah, aktivitas rendah dan penggunaan ulang yang sangat buruk sehingga perlu ditingkatkan dalam pengaplikasian katalitik. Dilaporkan dalam berbagai literatur bahwa sejumlah logam meningkatkan aktivitas dan konduktivitas katalitik, seperti besi, kromium, titanium, dan mangan yang memainkan peran penting dalam reaksi katalitik dan memiliki afinitas yang tinggi untuk penyimpanan hidrogen. Selain itu ZIF-8 dan oksida logam telah diterapkan dalam berbagai industri. Komposit ZIF-8 dengan FeO, MnO, ZnO, dan Co₂O merupakan bahan elektroda yang banyak digunakan untuk meningkatkan kapasitansi spesifik dalam sistem penyimpanan energi elektrokimia. Selain itu, dibandingkan dengan bahan berbasis karbon, oksida logam memberikan kepadatan energi yang lebih besar [6].

Oleh karena itu, review artikel ini akan membahas mengenai teknik sintesis komposit ZIF-8/logam oksida dengan berbagai metode dari penelitian sebelumnya, serta beberapa aplikasi ZIF-8 dalam studi sintesis komposit ZIF-8/logam oksida.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam mini review ini adalah studi literatur penelitian-penelitian yang membahas tentang pembuatan komposit ZIF-8/logam oksida dengan menggunakan berbagai metode serta aplikasinya di berbagai bidang. Data-data yang ada dikumpulkan dan disusun secara ringkas untuk membandingkan satu dengan yang lain, sehingga deskripsi yang konkret untuk mencapai tujuan penulis dalam mereview efektivitas metode sintesis komposit ZIF-8 dengan logam oksida, serta aplikasinya dalam berbagai bidang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode Sintesis Komposit ZIF-8/Logam Oksida *In situ growth*

In situ growth adalah pendekatan bottom-up yang tidak konvensional dimana struktur plasmonik, seperti nanopartikel yang dikontrol ukuran dan bentuk, terbentuk secara kimia mulai dari ion logam langsung pada bahan substrat target tanpa tahap sintesis koloid awal [7]. Metode ini merupakan metode sintesis yang sangat mudah, namun memiliki persyaratan yang sangat tinggi terhadap sifat material. Prinsip dasar dari metode ini adalah memanfaatkan beberapa gugus fungsi spesifik atau karakteristik permukaan dari bahan komponen untuk membuat gugus yang berbeda dengan mendistribusikan reaksi biokimia atau interaksi untuk mencapai tujuan pengikatan tanpa perlakuan apapun [8].

Senyawa yang menggunakan ZIF-8 sebagai templat dianggap memiliki kemampuan untuk mengatasi berbagai kelemahan struktural atau cacat intrinsik baik pada ZIF-8 itu sendiri maupun pada oksida logam yang terkompositkan. Dengan memanfaatkan kerangka ZIF-8 sebagai matriks pembentuk, proses sintesis dapat meningkatkan kestabilan struktural dan reaktivitas oksida logam, sekaligus memperbaiki sifat-sifat fungsional seperti luas permukaan, kapasitas adsorpsi, serta aktivitas katalitik. Pendekatan ini juga memungkinkan pengendalian yang lebih baik terhadap morfologi dan distribusi partikel oksida logam, yang pada akhirnya dapat meningkatkan performa keseluruhan material dalam aplikasi tertentu [9].

Metode *In situ growth* memiliki keunggulan signifikan dalam menghasilkan material yang lebih stabil [9] karena proses sintesisnya memungkinkan terbentuknya ikatan yang lebih kuat antara ZIF-8 dan logam oksida yang digunakan [10]. Stabilitas ini diperoleh dari interaksi langsung dan kuat antara kedua komponen selama pertumbuhan kristal, sehingga menghasilkan distribusi logam oksida yang lebih merata di dalam struktur ZIF-8. Selain itu, metode ini juga mendorong peningkatan efisiensi antarmuka, yang berkontribusi pada transfer muatan yang lebih baik dan kinerja material yang lebih unggul. Pada akhirnya, material yang dihasilkan memiliki daya tahan yang lebih tinggi, menjadikannya lebih tahan terhadap degradasi dan memiliki aplikasi yang lebih luas dalam berbagai bidang, termasuk katalis, penyimpanan energi, dan sensor [11].

Dalam penelitian [12], melakukan pra perlakuan terhadap kain katun (CF) dengan poli-dopamin karena gugus fungsi hidroksil fenolik dari

poli-dopamin dapat mengkelat Zn^{2+} , yang sangat membantu pertumbuhan in-situ $TiO_2/ZIF-8$ pada CF. Dalam mensintesis film ZIF-8, strategi in situ biasanya mengacu pada penempatan pembawa dalam sistem reaksi dalam kondisi hidrotermal, dan menggunakan sifat permukaan pembawa atau sarana bantu untuk mendapatkan film ZIF-8 kontinu pada permukaan pembawa. Metode sintesis in situ lainnya adalah metode difusi terbalik. Mekanismenya dengan menempatkan dua

larutan prekursor (sumber seng dan ligan 2-metilimidazol) pada kedua ujung matriks berpori. Perbedaan konsentrasi kedua larutan ini akan menyebabkan keduanya berdifusi ke arah berlawanan melalui pori-pori substrat, dan keduanya akan berinti dan membentuk film ketika bertemu di permukaan substrat. Meskipun metode *in situ growth* bersifat fasial, namun sulit untuk mendapatkan film padat melalui metode ini [13].

Tabel 1. Metode yang digunakan pada sintesis komposit ZIF-8/Logam Oksida

NO.	Material /Komposit	Metode Sintesis	Aplikasi	Referensi
1.	ZIF-8/ZnO-ZnCo ₂ O ₄ -NiO	Metode <i>In situ growth</i>	Superkapasitor	[9]
2.	ZnO/ZIF-8	Metode <i>In situ growth</i>	Sensor Kimia	[11]
3.	SnO ₂ /ZIF-8	Metode <i>In situ growth</i>	Perangkat Energi	[14]
4.	ZIF-8/ZnO	Metode <i>In situ growth</i>	Fotokatalisis	[15]
5.	ZIF-8/ZnO	Metode <i>In situ growth</i>	Sensor Gas	[16]
6.	MnO ₂ /ZIF-8	Metode <i>Template</i>	Adsorpsi	[17]
7.	Fe ₃ O ₄ /ZIF-8	Metode <i>Microfluidic</i>	Adsorpsi	[18]
8.	TiO ₂ /ZIF-8	Metode <i>Sonochemical</i>	Adsorpsi	[19]
9.	Mn ₃ O ₄ /ZIF-8	Metode <i>Solvothermal</i>	Adsorpsi	[20]
10.	Fe ₃ O ₄ /ZIF-8	Metode <i>In situ growth</i>	Sistem Pembawa Obat	[21]

Metode Modifikasi Permukaan

Metode modifikasi permukaan dilakukan dengan memperlakukan permukaan partikel nuklir dengan beberapa surfaktan, agen penggandeng atau benih kristal, sehingga dapat meningkatkan daya adsorpsi dan daya ikat antara partikel nano dan ZIF-8 yang akan mencapai kombinasi yang dekat dari keduanya. Metode ini memiliki keuntungan dari operasi sederhana dan penerapan yang kuat [22], [23], [24]. Metode pertumbuhan sekunder kristal benih adalah jenis metode modifikasi permukaan, yang menggunakan partikel **benih** ZIF-8 skala nano sebagai pengganti reagen kimia untuk membuat dan memodifikasi permukaan partikel pembawa, dan mempercepat

pertumbuhan kristal ZIF-8 melalui efek pemandu struktur kristal benih yang akhirnya membentuk cangkang ZIF-8 yang padat dan berkesinambungan yang menutupi pembawa. Metode ini secara efektif dapat melemahkan sensitivitas kristal ZIF-8 terhadap kondisi sintesis, sementara itu, presipitasi kristal dari larutan dapat secara efektif dihambat [25].

Metode Sintesis *Template*

Metode sintesis *template* mengacu pada penggunaan beberapa sistem molekuler (metode *template* lunak) atau beberapa bahan dengan struktur yang relatif kaku (metode *template* keras) tanpa struktur tetap tetapi dengan kemampuan

membatasi ambang batas dalam ruang tertentu untuk membatasi dan memengaruhi pertumbuhan partikel atau cangkang nuklir. Surfaktan, agen penutup atau bahkan ion biasanya digunakan untuk menstabilkan pra nanopartikel yang disintesis dan kemudian NP yang diolah ini dilapisi dengan ZIF-8 dengan memasukkannya ke dalam larutan sintesis yang mengandung blok struktur molekul ZIF-8. Terungkap dari penelitian sebelumnya, ZIF-8 telah terbukti menjadi inang yang lebih ideal untuk bahan tamu jika dibandingkan dengan material porous konvensional seperti zeolit, karena pori-pori yang dapat disesuaikan dan porositas yang tinggi memberinya akses yang lebih mudah ke partikel yang terkurung dan transmisi masa yang lebih cepat [26], [27], [28].

Metode mikroemulsi merupakan salah satu metode soft template yang paling umum. Prinsip terkait metode ini adalah bahwa dua pelarut yang tidak kompatibel membentuk emulsi dibawah aksi surfaktan, reaktan yang berinti di tengah mikro gelembung atau di dinding luar kemudian menyatu untuk membentuk partikel berongga monodispersi atau partikel kulit inti kulit monodispersi dengan sifat antarmuka yang baik [29].

Adapun metode hard template melibatkan masalah reaktivitas bahan template dan penghilangan template, terdapat sedikit penelitian yang terkait. Dalam penelitian Un et al, Pd/ZnO corr yang dianggap sebagai hard template yang dibentuk melalui pemuatan Pd nanopartikel pada permukaan mikrosfer 280 melalui pertumbuhan ZIF-8 in situ yang diinduksi oleh ZnO dengan cara melapisi Pd/ZnO dengan lapisan ZIF-shell tanpa cacat sehingga memperoleh komposit P/ZnO/ZIF-core-shell [30].

Induksi logam homolog juga termasuk dalam metode template. Penerapan metode ini pada sintesis komposit ZIF-8, penyiapan partikel inti-kulit ZIF-8 sama dengan penyiapan membran ZIF-8. Ketika menyiapkan partikel inti kulit ZIF-8, ZnO atau senyawa padat yang mengandung Zn dapat menggantikan garam seng terlarut sebagai sumber seng, sehingga tidak diperlukan sumber seng tambahan, tetapi mengingat persyaratan kepadatan film ZIF-8 yang tinggi, permintaan besar sumber seng tambahan perlu dilakukan. Dengan cara ini, fungsi ZnO atau senyawa padat yang mengandung Zn sebagai sumber seng melemah, sehingga lebih terfokus pada induksi pertumbuhan material ZIF-8 yang serupa dengan fungsi kristal benih dalam metode pertumbuhan sekunder kristal benih. Selain itu terdapat juga penelitian yang menggunakan Al_2O_3 , $\text{Zn}(\text{OH})_2$ untuk menginduksi sintesis film ZIF-8 [31], [32].

Metode Lain

Selain metode sintesis utama di atas, ada juga strategi sintesis baru lainnya. Seperti, metode sonokimia, metode sintesis mikroreaktor, pertumbuhan bertahap (LPE), deposisi metode reduksi dan sebagainya. Zeng dkk. $\text{TiO}_2/\text{ZIF-8}$ yang mudah disiapkan melalui metode sonokimia [19]. Sintesis mikroreaktor juga strategi sintesis lain yang relatif baru, dibandingkan dengan metode sintesis hidrotermal tradisional, metode ini memiliki keuntungan sebagai berikut: (i) luas permukaan spesifiknya lebih besar, yaitu kondusif bagi kontak penuh antara reaktan yang berbeda; (ii) itu konduktivitas termal jauh melebihi reaktor tradisional, yang memungkinkan reaktor mikro memanaskan atau mendinginkan dengan cepat dalam waktu singkat waktu; (iii) laju perpindahan massa yang lebih cepat membuat waktu pencampuran menjadi lebih lama antar reaktan menjadi sangat pendek; (iv) kondisi sintesis mudah disesuaikan. Karena banyaknya reaktan yang dibutuhkan dalam mikroreaktor sangat kecil, sesuai dengan percobaannya kondisi seperti suhu, tekanan, laju aliran reaktan dan waktu tinggal reaksi dapat dengan mudah disesuaikan. Strategi LPE sebelumnya digunakan untuk membuat membran MOF pada bahan lain aplikasi dalam membangun lapisan ZIF-8 pada substrat bubuk adalah jarang diselidiki [33], [34]. Di antara metode yang telah dilaporkan, merupakan tantangan untuk menumbuhkan MOF dalam ruang terkendali. Shekhah dkk. pertama kali mendeposisikan lapisan MOF pada substrat curah yang dimodifikasi dengan LPE rout [35]. Melalui metode ini, mereka mencapai operasi yang layak dari lapisan MOF dalam saluran mesoskopik yang teratur, dan menjaga sifat-sifat masing-masing komponen pada saat yang sama. Kemudian Peng dkk. mempelajari dari mereka dan mengendapkan lapisan ZIF-8 pada serbuk nano SiO_2 melalui pendekatan ini [36]. Strategi ini memastikan pertumbuhan ZIF-8 yang stabil di sekitar permukaan substrat dan melindungi ZIF-8 dari nukleasi dalam larutan prekursor.

Perlu dicatat bahwa dalam produksi praktis komposit ZIF-8, strategi sintesisnya bersifat non monotonik [37]. Sebagai contoh, studi Wu dkk., mereka menggunakan metode modifikasi permukaan dan metode solvothermal untuk membuat $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZIF-8}$, polystyrene sulfonate sodium (PSS) diaplikasikan untuk memodifikasi partikel Fe_3O_4 , oleh karena itu untuk mendorong nukleasi dan pertumbuhan ZIF8 pada permukaan Fe_3O_4 [38]. Komposit yang disintesis menunjukkan mikropori yang seragam, luas

permukaan yang tinggi serta stabilitas yang baik dalam air. Dengan demikian, dengan tujuan untuk mendapatkan komposit ZIF-8 dengan sifat yang optimal, metode sintesis yang berbeda dapat digunakan secara sinergis selama proses sintesis [25].

Aplikasi Komposit ZIF-8/Logam Oksida

Aplikasi dari hasil sintesis komposit ZIF-8 dengan logam oksida dimanfaatkan diberbagai bidang industri seperti sensor, fotokatalis, adsorpsi, penyimpanan energi dan lain-lain. Salah satu aplikasinya adalah peningkatan kinerja sensor gas. Memiliki struktur pori-pori yang stabil membantu dalam menyaring molekul gas dan meningkatkan selektivitas sehingga mampu mengurangi gangguan dari gas lain [16]. Sensor berbasis komposit ini menunjukkan stabilitas yang baik, respon cepat, serta kemampuan deteksi pada konsentrasi gas yang rendah, sehingga cocok untuk digunakan dalam aplikasi yang memerlukan deteksi gas berbahaya dalam waktu nyata [39]. Selain sensor gas, penggunaan material komposit ini menawarkan potensi aplikasi yang sangat luas terutama dalam pengembangan sensor kimia untuk pemantauan lingkungan dan aplikasi, karena ZIF-8 dapat bertindak sebagai pelindung yang efektif untuk ZnO dari korosi permukaan sehingga menjaga kestabilan performa elektroda selama proses deteksi [40]. Komposit ZIF-8 dapat digunakan sebagai penyimpanan energi. Salah satunya aplikasi dalam superkapasitor dan baterai, Komposit ini dapat digunakan karena kombinasi antara sifat listrik oksida logam dan porositas ZIF-8 yang tinggi sehingga membantu dalam menyimpan dan melepaskan energi dengan efisien [6].

Selain itu, berdasarkan penelitian oleh [41] mengenai komposit ZIF-8 dengan TiO_2 yang diaplikasi untuk absorpsi dan aktivitas fotokatalitik tetrasiklin. Sampel dengan katalis ZIF-8 memiliki kapasitas adsorpsi yang signifikan dalam gelap, karena komposit ZIF-8 dengan TiO_2 terbukti mampu mengadsorpsi lebih dari 40% dan ZIF-8 menyerap 40% karena porositasnya yang tinggi dan luas permukaan spesifiknya yang tinggi. Kemudian pada saat memasuki waktu 40 menit, laju degradasi TC komposit ZIF-8 dan TiO_2 hampir mencapai 90%, sementara TiO_2 dan ZIF-8 mendegradasi TC kurang dari 70%.

Komposit ZIF-8 dengan logam oksida juga dapat diaplikasikan sebagai sistem pembawa obat, hal ini dikarenakan material berpori dengan respons magnetik yang cepat dapat mengantarkan obat ke jaringan atau organ tertentu di bawah aksi

medan magnet, dan mengontrol pelepasan obat melalui respons magnetik, sehingga meningkatkan konsentrasi obat yang efektif di tempat target dan mengurangi efek toksik dan efek samping pada jaringan normal. ZIF-8 memiliki keunggulan rentang ukuran pori yang besar dan penyesuaian ukuran pori yang mudah. Ini dapat dikombinasikan dengan bahan magnetik untuk menyiapkan bahan ZIF-8 magnetik untuk pelepasan obat yang dikendalikan oleh respons magnetik [21].

Sistem pelepasan terkontrol obat MOF respon magnetik telah menarik banyak perhatian [21]. Chen dkk. menggunakan natrium asetat dan natrium sitrat sebagai penstabil untuk mensintesis nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ dengan struktur inti / cangkang dalam metode satu pot dalam kondisi solvothermal. Tingkat pemuatan DOX dari nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ yang disiapkan dapat mencapai 76,6%. Studi efek fotothermal penargetan magnetik penargetan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ menunjukkan bahwa sel kanker di daerah pengayaan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ dapat secara efektif dibunuh setelah iradiasi laser 808nm, tetapi efek pada sel kanker yang tidak memiliki $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ dapat diabaikan, yang menunjukkan bahwa $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZIF-8}$ memiliki sifat penargetan magnetik yang jelas [42].

Berdasarkan penelitian Rabbani dkk, yang menggunakan material komposit $\text{CeO}_2/\text{ZIF-8}$ dan diaplikasikan sebagai superkapasitor. Dalam penelitian ini, kelas baru elektroda MOF logam tanah jarang yang digabungkan dengan elektroda MOF (Ce-MOF) disintesis melalui strategi kimia basah dan dipelajari untuk aplikasi potensial dalam superkapasitor. Analisis FE-SEM dan HRTEM mengungkapkan morfologi nano-polyhedron hirarkis untuk elektroda yang disiapkan. Aktivitas elektrokimia yang sangat baik untuk elektroda Ce-MOF diungkapkan oleh analisis CV, GCD dan EIS menggunakan tiga pengukuran elektroda dalam 3 M KOH. Kapasitansi tertinggi 424,2 F.g⁻¹ dicapai untuk elektroda komposit Ce-ZIF-8-0,5 dengan pengukuran tiga elektroda. Perangkat SSC yang dibuat menggunakan elektroda komposit Ce/ZIF-8-0,5 menunjukkan nilai E 18,3 W.h.kg⁻¹ pada nilai P 1 k.W.kg⁻¹ dengan Cs 132 F.g⁻¹ pada 1 A.g⁻¹ bersama dengan retensi Cs yang luar biasa sebesar 90% lebih dari 5000 siklus. Lebih lanjut, kinerja perangkat superkapasitor asimetris telah dinilai dan perangkat tersebut menghasilkan kapasitansi tinggi (89 F.g⁻¹ @ 1 A.g⁻¹), kepadatan energi yang lebih tinggi (31,3 W.h.kg⁻¹ @ 800 W.kg⁻¹), yang mengindikasikan kinerja elektrokimia yang lebih tinggi dari perangkat Ce/ZIF-8 -0.5//AC. Studi ini menegaskan bahwa

Ce/ZIF-8 -0.5 yang dioptimalkan adalah bahan elektroda alternatif untuk aplikasi superkapasitor

penyimpanan energi yang lebih baik secara keseluruhan [43].

Tabel 2. Aplikasi Komposit ZIF-8/ Logam Oksida

No.	Material/Komposit	Aplikasi	Referensi
1.	ZIF-8/ZnO-ZnCo ₂ O ₄ -NiO	Superkapasitor penyimpanan energi	[9]
2.	ZIF-8/ZnO	Meningkatkan sensing ethanol gas	[16]
3.	Fe ₃ O ₄ /ZIF-8	Sistem pengantar obat	[21]
4.	ZIF-8/TiO ₂	Meningkatkan penyerapan dan aktivitas fotokatalitik dalam degradasi tetrasiklin	[41]
5.	CeO ₂ /ZIF-8	Superkapasitor penyimpanan energi	[43]
6.	ZIF-8/TiO ₂	Meningkatkan aktivitas fotokatalitik dalam pembangkitan hidrogen	[44]
7.	C-ZnO/TiO ₂ /ZIF-8	Meningkatkan penyerapan dan aktivitas fotokatalitik	[45]
8.	ZIF-8/ZnO	Fotokatalisis	[46]
9.	Cu ₂ O/ZIF-8	Katalis	[47]
10.	CoMoO ₄ /ZIF-8	Fotokatalisis	[48]

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dalam artikel ini, dapat disimpulkan bahwa ZIF-8 merupakan material yang memiliki pori dan struktur yang berbentuk sodalit dengan pori 11,6Å, lebar pori 3,4Å dan luas permukaan 1947 m²/g serta volume pori 0,663 cm³/g. Komposit ZIF-8/logam oksida memberikan keunggulan yang unik karena menggabungkan sifat-sifat dari ZIF-8 dan logam oksida sehingga menghasilkan material dengan performa tinggi di berbagai aplikasi. Kelebihan dari masing-masing metode sintesis mendukung aplikasi yang berbeda sesuai kebutuhan spesifik sifat dari komposit. Efektivitas dari komposit di berbagai bidang yang telah ditunjukkan dalam pemaparan diatas menjadikannya solusi multifungsi yang menjanjikan. Penelitian lanjutan masih diperlukan untuk mengatasi hambatan seperti pengendalian struktur komposit dan distribusi logam oksida serta untuk memperluas potensi aplikasinya di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. Song *et al.*, “Zeolitic imidazolate framework (ZIF-8) based polymer nanocomposite membranes for gas separation,” *Energy Environ Sci*, vol. 5, no. 8, pp. 8359–8369, 2012, doi: 10.1039/c2ee21996d.
- [2] K. S. Park *et al.*, “Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks,” 2006. [Online]. Available: www.pnas.org/cgidoi10.1073/pnas.0602439103
- [3] A. Hadi, J. Karimi-Sabet, and A. Dastbaz, “Parametric study on the mixed solvent synthesis of ZIF-8 nano- and micro-particles for CO adsorption: A response surface study,” *Front Chem Sci Eng*, vol. 14, no. 4, pp. 579–594, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11705-018-1770-3.
- [4] D. Yamamoto, T. Maki, S. Watanabe, H. Tanaka, M. T. Miyahara, and K. Mae, “Synthesis and adsorption properties of ZIF-8 nanoparticles using a micromixer,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 227, pp. 145–150, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.cej.2012.08.065.
- [5] X. Liu *et al.*, “Improvement of hydrothermal stability of zeolitic imidazolate frameworks,” *Chemical Communications*, vol. 49, no. 80, pp. 9140–9142, Sep. 2013, doi: 10.1039/c3cc45308a.
- [6] F. Kümbetlioğlu, K. O. Oskay, Z. Çıplak, and A. Ateş, “Preparation, Characterization, and Application of Metal Oxide-Doped Zeolitic Imidazolate Framework,” *ACS*

- Omega*, vol. 8, no. 30, pp. 27650–27662, Aug. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c03509.
- [7] G. A. Vinnacombe-Willson, Y. Conti, A. Stefancu, P. S. Weiss, E. Cortés, and L. Scarabelli, “Direct Bottom-Up In situ growth: A Paradigm Shift for Studies in Wet-Chemical Synthesis of Gold Nanoparticles,” Jul. 12, 2023, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00914.
- [8] A. Sharsheeva *et al.*, “Light-controllable systems based on TiO₂-ZIF-8 composites for targeted drug release: Communicating with tumour cells,” *J Mater Chem B*, vol. 7, no. 43, pp. 6810–6821, 2019, doi: 10.1039/c9tb01377f.
- [9] C. Huang *et al.*, “In situ growth of ZIF-8-derived ternary ZnO/ZnCo₂O₄/NiO for high performance asymmetric supercapacitors,” *Nanoscale*, vol. 11, no. 20, pp. 10114–10128, May 2019, doi: 10.1039/c9nr02230a.
- [10] H. yan Niu, L. qin Cao, X. le Yang, K. nan Liu, L. Liu, and J. de Wang, “In situ growth of the ZIF-8 on the polymer monolith via CO₂-in-water HIEPs stabilized using metal oxide nanoparticles and its photocatalytic activity,” *Polym Adv Technol*, vol. 32, no. 8, pp. 3194–3204, Aug. 2021, doi: 10.1002/pat.5331.
- [11] W. W. Zhan, Q. Kuang, J. Z. Zhou, X. J. Kong, Z. X. Xie, and L. S. Zheng, “Semiconductor@metal-organic framework core-shell heterostructures: A case of ZnO@ZIF-8 nanorods with selective photoelectrochemical response,” *J Am Chem Soc*, vol. 135, no. 5, pp. 1926–1933, Feb. 2013, doi: 10.1021/ja311085e.
- [12] J. Ran *et al.*, “Polydopamine-induced in-situ growth of zeolitic imidazolate framework-8/TiO₂ nanoparticles on cotton fabrics for photocatalytic performance,” *Prog Org Coat*, vol. 152, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.106123.
- [13] X. Jiang, S. Li, Y. Bai, and L. Shao, “Ultra-facile aqueous synthesis of nanoporous zeolitic imidazolate framework membranes for hydrogen purification and olefin/paraffin separation,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 7, no. 18, pp. 10898–10904, 2019, doi: 10.1039/c8ta11748a.
- [14] F. Cheng, W. C. Li, J. N. Zhu, W. P. Zhang, and A. H. Lu, “Designed synthesis of nitrogen-rich carbon wrapped Sn nanoparticles hybrid anode via in-situ growth of crystalline ZIF-8 on a binary metal oxide,” *Nano Energy*, vol. 19, pp. 486–494, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.nanoen.2015.10.033.
- [15] B. Yu, F. Wang, W. Dong, J. Hou, P. Lu, and J. Gong, “Self-template synthesis of core-shell ZnO@ZIF-8 nanospheres and the photocatalysis under UV irradiation,” *Mater Lett*, vol. 156, pp. 50–53, May 2015, doi: 10.1016/j.matlet.2015.04.142.
- [16] S. Feng, X. Jia, J. Yang, Y. Li, S. Wang, and H. Song, “One-pot synthesis of core-shell ZIF-8@ZnO porous nanospheres with improved ethanol gas sensing,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, no. 24, pp. 22534–22545, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10854-020-04764-y.
- [17] M. Jian, H. Wang, R. Liu, J. Qu, H. Wang, and X. Zhang, “Self-assembled one-dimensional MnO₂@zeolitic imidazolate framework-8 nanostructures for highly efficient arsenite removal,” *Environ Sci Nano*, vol. 3, no. 5, pp. 1186–1194, 2016, doi: 10.1039/c6en00246c.
- [18] M. Faustini *et al.*, “Microfluidic approach toward continuous and ultrafast synthesis of metal-organic framework crystals and hetero structures in confined microdroplets,” *J Am Chem Soc*, vol. 135, no. 39, pp. 14619–14626, Oct. 2013, doi: 10.1021/ja4039642.
- [19] X. Zeng, L. Huang, C. Wang, J. Wang, J. Li, and X. Luo, “Sonocrystallization of ZIF-8 on Electrostatic Spinning TiO₂ Nanofibers Surface with Enhanced Photocatalysis Property through Synergistic Effect,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 31, pp. 20274–20282, Aug. 2016, doi: 10.1021/acsami.6b05746.
- [20] L. Hu, G. Deng, W. Lu, Y. Lu, and Y. Zhang, “Peroxy monosulfate activation by Mn₃O₄/metal-organic framework for degradation of refractory aqueous organic pollutant rhodamine B,” *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1360–1372, Aug. 2017, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62875-4.

- [21] Y. N. Wu *et al.*, "Magnetic metal-organic frameworks: γ -Fe₂O₃@MOFs via confined in situ pyrolysis method for drug delivery," *Small*, vol. 10, no. 14, pp. 2927–2936, Jul. 2014, doi: 10.1002/sml.201400362.
- [22] L. Li *et al.*, "Accelerating Chemo- And Regioselective Hydrogenation of Alkynes over Bimetallic Nanoparticles in a Metal-Organic Framework," *ACS Catal*, vol. 10, no. 14, pp. 7753–7762, Jul. 2020, doi: 10.1021/acscatal.0c00177.
- [23] Y. Yang *et al.*, "Nanoporous Gold Embedded ZIF Composite for Enhanced Electrochemical Nitrogen Fixation," *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 58, no. 43, pp. 15362–15366, Oct. 2019, doi: 10.1002/anie.201909770.
- [24] Q. Yang, Q. Xu, S. H. Yu, and H. L. Jiang, "Pd Nanocubes@ZIF-8: Integration of Plasmon-Driven Photothermal Conversion with a Metal-Organic Framework for Efficient and Selective Catalysis," *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 55, no. 11, pp. 3685–3689, Mar. 2016, doi: 10.1002/anie.201510655.
- [25] H. Dai *et al.*, "Recent advances on ZIF-8 composites for adsorption and photocatalytic wastewater pollutant removal: Fabrication, applications and perspective," Aug. 15, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ccr.2021.213985.
- [26] C. Dai *et al.*, "Synthesis of yolk-shell HPW@Hollow silicalite-1 for esterification reaction," *Chemical Communications*, vol. 50, no. 37, pp. 4846–4848, Apr. 2014, doi: 10.1039/c4cc00693c.
- [27] F. Bedioui, "COOH/HAF/OH CHEMISTRY Zeolite-encapsulated and clay-intercalated metal porphyrin, phthalocyanine and Schiff-base complexes as models for biomimetic oxidation catalysts: an overview," 1995.
- [28] G. Cai, M. Ding, Q. Wu, and H. L. Jiang, "Encapsulating soluble active species into hollow crystalline porous capsules beyond integration of homogeneous and heterogeneous catalysis," *Natl Sci Rev*, vol. 7, no. 1, pp. 37–45, Jan. 2020, doi: 10.1093/nsr/nwz147.
- [29] Y. Yang *et al.*, "Hollow metal-organic framework nanospheres via emulsion-based interfacial synthesis and their application in size-selective catalysis," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 20, pp. 18163–18171, Oct. 2014, doi: 10.1021/am505145d.
- [30] L. Lin, T. Zhang, H. Liu, J. Qiu, and X. Zhang, "In situ fabrication of a perfect Pd/ZnO@ZIF-8 core-shell microsphere as an efficient catalyst by a ZnO support-induced ZIF-8 growth strategy," *Nanoscale*, vol. 7, no. 17, pp. 7615–7623, May 2015, doi: 10.1039/c5nr00257e.
- [31] Y. Liu, N. Wang, J. H. Pan, F. Steinbach, and J. Caro, "In situ synthesis of MOF membranes on ZnAl-CO₃ LDH buffer layer-modified substrates," *J Am Chem Soc*, vol. 136, no. 41, pp. 14353–14356, Oct. 2014, doi: 10.1021/ja507408s.
- [32] P. Hu *et al.*, "Room temperature synthesis of ZIF-8 membranes from seeds anchored in gelatin films for gas separation," *CrystEngComm*, vol. 17, no. 7, pp. 1576–1582, Feb. 2015, doi: 10.1039/c4ce02322f.
- [33] M. C. So *et al.*, "Post-assembly transformations of porphyrin-containing metal-organic framework (MOF) films fabricated via automated layer-by-layer coordination," *Chemical Communications*, vol. 51, no. 1, pp. 85–88, Jan. 2015, doi: 10.1039/c4cc05727a.
- [34] J. Liu *et al.*, "Harnessing Ag nanofilm as an electrons transfer mediator for enhanced visible light photocatalytic performance of Ag@AgCl/Ag nanofilm/ZIF-8 photocatalyst," *Appl Catal B*, vol. 202, pp. 64–71, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.apcatb.2016.09.015.
- [35] O. Shekhah *et al.*, "Step-by-step route for the synthesis of metal-organic frameworks," *J Am Chem Soc*, vol. 129, no. 49, pp. 15118–15119, Dec. 2007, doi: 10.1021/ja076210u.
- [36] J. Peng *et al.*, "Controllable growth of ZIF-8 layers with nanometer-level precision on SiO₂ nano-powders via liquid phase epitaxy stepwise growth approach," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 268, pp. 268–275, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.micromeso.2018.04.005.
- [37] Z. Lei, Y. Deng, and C. Wang, "Multiphase surface growth of hydrophobic ZIF-8 on melamine sponge for excellent oil/water separation and effective catalysis in a

- Knoevenagel reaction,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 6, no. 7, pp. 3258–3263, 2018, doi: 10.1039/c7ta10566e.
- [38] Y. Wu *et al.*, “Magnetic metal-organic frameworks (Fe₃O₄@ZIF-8) composites for U(VI) and Eu(III) elimination: simultaneously achieve favorable stability and functionality,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 378, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.122105.
- [39] Y. Li *et al.*, “Synthesis of Co₃O₄/ZnO nano-heterojunctions by one-off processing ZIF-8@ZIF-67 and their gas-sensing performances for trimethylamine,” *Sens Actuators B Chem*, vol. 308, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.snb.2020.127657.
- [40] H. Mei *et al.*, “Rational design of ZnO@ZIF-8 nanoarrays for improved electrochemical detection of H₂O₂,” *CrystEngComm*, vol. 24, no. 8, pp. 1645–1654, Feb. 2022, doi: 10.1039/d1ce01704g.
- [41] R. Li, W. Li, C. Jin, Q. He, and Y. Wang, “Fabrication of ZIF-8@TiO₂ micron composite via hydrothermal method with enhanced absorption and photocatalytic activities in tetracycline degradation,” *J Alloys Compd*, vol. 825, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154008.
- [42] G. Chen, B. Yu, C. Lu, H. Zhang, Y. Shen, and H. Cong, “Controlled synthesis of Fe₃O₄@ZIF-8 nanoparticles for drug delivery,” *CrystEngComm*, vol. 20, no. 46, pp. 7486–7491, 2018, doi: 10.1039/c8ce01302k.
- [43] I. Rabani, K. Karuppasamy, D. Vikraman, Z. ul haq, H. S. Kim, and Y. S. Seo, “Hierarchical structured nano-polyhedrons of CeO₂@ZIF-8 composite for high performance supercapacitor applications,” *J Alloys Compd*, vol. 875, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.160074.
- [44] M. Zhang, Q. Shang, Y. Wan, Q. Cheng, G. Liao, and Z. Pan, “Self-template synthesis of double-shell TiO₂@ZIF-8 hollow nanospheres via sonocrystallization with enhanced photocatalytic activities in hydrogen generation,” *Appl Catal B*, vol. 241, pp. 149–158, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apcatb.2018.09.036.
- [45] H. T. Wang *et al.*, “Design and synthesis of porous C–ZnO/TiO₂@ZIF-8 multi-component nano-system via pyrolysis strategy with high adsorption capacity and visible light photocatalytic activity,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 288, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.micromeso.2019.06.010.
- [46] X. Wang *et al.*, “Rapid Construction of ZnO@ZIF-8 Heterostructures with Size-Selective Photocatalysis Properties,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 14, pp. 9080–9087, Apr. 2016, doi: 10.1021/acsami.6b00028.
- [47] B. Li, J. G. Ma, and P. Cheng, “Silica-Protection-Assisted Encapsulation of Cu₂O Nanocubes into a Metal–Organic Framework (ZIF-8) To Provide a Composite Catalyst,” *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 57, no. 23, pp. 6834–6837, Jun. 2018, doi: 10.1002/anie.201801588.
- [48] S. Vadivel, A. Muthuraj, M. Anbazhagan, S. Abdul samad, and R. Arumugam, “A novel CoMoO₄ enwrapped ZIF-8 nanocomposite with enhanced visible light photocatalytic activity,” *Environmental Pollution*, vol. 336, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.122450.