

## MINI-REVIEW: VARIASI AGEN DEPROTONASI DALAM SINTESIS ZIF-8 DAN APLIKASINYA

### MINI-REVIEW: VARIATIONS OF DEPROTONATING AGENTS IN THE SYNTHESIS OF ZIF-8 AND THEIR APPLICATIONS

Ulfa Fausiah, Husna Syaima\*

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

\*Corresponding Author : husna.syaima@fmipa.unmul.ac.id

#### ABSTRACT

*Mini-review this discusses recent studies related to the synthesis of ZIF-8 with variations of deprotonation agents and their applications. ZIF-8 with the molecular formula  $C_8H_{12}N_4Zn$  is generally synthesized from  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (zinc nitrate hexahydrate) or other metal salts as a central metal source bonded to  $C_4H_6N_2$  (2-methylimidazole) as an organic compound and water as a solvent. In recent years, research on ZIF-8 has continued to grow with various modifications made by researchers. The synthesis process generally involves the use of expensive and flammable organic solvents in the synthesis medium and results in harmful effects to the environment due to its toxic nature. This raises urgency in ZIF-8 synthesis innovation, one of which is with a green synthesis method using water-based solvents. In the synthesis of ZIF-8, deprotonation agents such as  $NH_4OH$ , TEA,  $NaOH$  and others are often used. The use of this deprotonation agent allows the formation of ZIF-8 with good crystal size, surface area, pore volume and % yield from ZIF-8 produced both synthetic ZIF-8 can be used in various fields such as antibiotic adsorption, catalysts, and separation.*

**Keywords :** synthesis, deprotonation, ZIF-8, antibiotic

#### ABSTRAK

*Mini-review ini membahas mengenai studi terbaru yang berkaitan dengan sintesis ZIF-8 dengan variasi agen deprotonasi serta aplikasinya. ZIF-8 dengan rumus molekul  $C_8H_{12}N_4Zn$  umumnya disintesis dari  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (seng nitrat heksahidrat) atau garam logam lainnya sebagai sumber logam pusat yang terikat dengan  $C_4H_6N_2$  (2-metilimidazol) sebagai senyawa organik dan air sebagai pelarut. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian tentang ZIF-8 terus berkembang dengan berbagai modifikasi yang dilakukan oleh para peneliti. Proses sintesis secara umum melibatkan penggunaan pelarut organik yang mahal dan mudah terbakar dalam media sintesis serta mengakibatkan efek berbahaya bagi lingkungan karena sifatnya yang beracun. Hal ini menimbulkan urgensi dalam inovasi sintesis ZIF-8, salah satunya dengan metode sintesis hijau dengan menggunakan pelarut berbasis air. Dalam sintesis ZIF-8 ini agen deprotonasi seperti,  $NH_4OH$ , TEA,  $NaOH$  dan lain-lain seringkali digunakan. Penggunaan agen deprotonasi ini memungkinkan terbentuknya ZIF-8 yang baik dengan ukuran kristal, luas permukaan, volume pori serta % rendemen dari ZIF-8 yang dihasilkan baik ZIF-8 hasil sintesis dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti adsorpsi antibiotik, katalis, dan pemisahan.*

**Kata kunci :** Sintesis, Deprotonasi, ZIF-8, Antibiotik

#### PENDAHULUAN

*Metal-Organic Framework (MOF)* merupakan koordinasi ion logam (gugus) sebagai simpul dengan ligan organik sebagai penghubung. Kelas material ini berkembang pesat yang ditandai oleh porositasnya yang tinggi dan fungsionalitas yang melimpah [1]. MOF memiliki aplikasi yang cukup serbaguna seperti adsorpsi, pemisahan, biomedis dan

katalis [2]. Baru-baru ini, kerangka imidazolat zeolitik (ZIF), kelas baru kerangka logam organik (MOF) dengan ion logam dan penghubung organik, telah dipilih sebagai kandidat potensial dalam berbagai aplikasi [3].

*Zeolitic Imidazolate Frameworks (ZIFs)* memiliki ikatan yang kuat antara ion logam dan penghubung organik memberikan kristalinitas ZIF yang tinggi dan struktur pori yang seragam

[4]. Di antara beberapa jenis ZIF, ZIF-8 banyak dipelajari oleh para peneliti karena ZIF-8 mudah disintesis, luas permukaan yang tinggi, karbon berpori nano dan aplikasinya yang beragam [4]. Secara umum, ZIF-8 disintesis dalam pelarut organik melalui berbagai metode seperti solvothermal pada suhu tinggi, solvothermal dengan bantuan gelombang mikro [5], ultrasonik [6], dan hidrotermal [7]. Penggunaan pelarut organik yang mahal dan mudah terbakar ini dalam media sintesis mengakibatkan efek berbahaya bagi lingkungan karena sifatnya yang beracun [8]. Sehingga perlunya inovasi baru dalam sintesis ZIF-8, salah satunya dengan metode sintesis hijau, yaitu dengan menggunakan pelarut berbasis air disebut metode hidrotermal. Metode ini memanfaatkan agen deprotonasi pada sintesisnya.

Pada sintesis ZIF-8 biasa memerlukan agen deprotonasi. Agen deprotonasi adalah senyawa alkali yang bereaksi menetralkan atau menghilangkan proton dari imina kelompok dalam cincin imidazol [9]. Hal ini untuk membentuk situs koordinasi dalam kation logam, sehingga menghasilkan ZIF-8 dengan struktur dan hasil yang baik. Selain itu agen deprotonasi dapat mengurangi rasio penggunaan bahan dalam sintesis. Seperti dalam penelitian Kida et al. 2013[10] berhasil mensintesis ZIF-8 pada suhu ruangan dengan pelarut air dengan rasio reagen  $\text{Zn}^{2+}/\text{Hmim}$  yang tinggi yaitu 1:40 menghasilkan luas permukaan dan volume mikropori yang tinggi ( $0,65 \text{ cm}^3/\text{g}$ ). Selain itu, dilaporkan bahwa konsentrasi ligan organik juga dapat dikurangi dengan memasukkan agen deprotonasi tipe basa ke dalam campuran sintesis seperti triethylamine [11], n-butylamine, sodium formate, 1-methylimidazole [12], ammonium hidroksida dan Natrium hidroksida [13]. Berdasarkan hal tersebut sintesis ZIF-8 dalam suhu ruangan dan menggunakan pelarut air dengan rasio reagen rendah dan volume mikropori tinggi masih dianggap sebagai tantangan besar bagi peneliti.

Oleh karena itu, pada artikel mini-review ini akan dibahas mengenai sintesis dan mekanisme ZIF-8 pada berbagai penelitian sebelumnya. Selain itu juga akan dibahas peran agen deprotonasi dalam sintesis ZIF-8, beberapa senyawa yang digunakan sebagai

agen deprotonasi serta aplikasi ZIF-8 yang dilakukan oleh berbagai penelitian sebelumnya

## METODOLOGI PENELITIAN

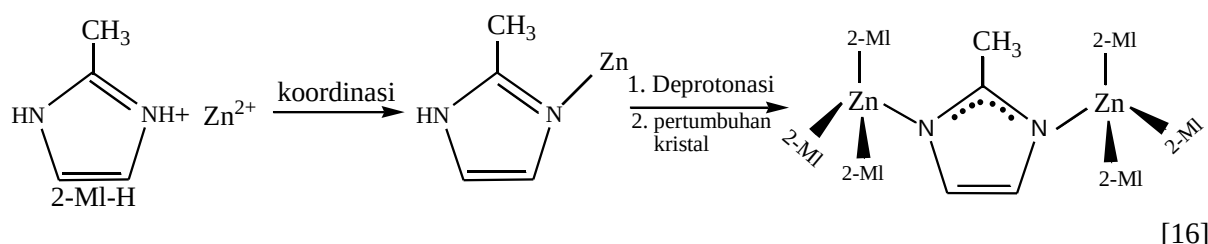
Metode yang digunakan dalam mini review ini adalah penelitian-penelitian yang membahas tentang pembuatan ZIF-8 dengan menggunakan variasi agen deprotonasi, penelitian analisis struktur ZIF-8 serta aplikasinya dalam beberapa tahun terakhir. Data-data yang ada dikumpulkan dan disusun secara ringkas untuk membandingkan satu dengan yang lain, sehingga didapatkan deskripsi yang konkret untuk mencapai tujuan penulis dalam mereview variasi agen deprotonasi dalam sintesis ZIF-8 dan aplikasinya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Mekanisme Sintesis ZIF-8

Mekanisme Sintesis ZIF-8 Mekanisme pembentukan kristal ZIF-8, dalam sistem berbasis metanol dan air agak berbeda jika mempertimbangkan kemurnian fasa dan morfologi yang diamati pada sampel yang disintesis. Secara umum diasumsikan bahwa pelarut bertindak sebagai cetakan dalam mengarahkan struktur ZIF. Melalui interaksi non-kovalen dalam menjembatani dan menstabilkan pori-pori selama pertumbuhan kristal. Menurut literatur, koordinasi antara ion  $\text{Zn}^{2+}$  dan elektron nitrogen piridinat imidazol yang kekurangan elektron dalam molekul penghubung untuk membentuk kompleks  $\text{Zn}(\text{Hmim})^{2+}$  merupakan langkah pertama pembentukan ZIF-8 [14].

Setelah itu kompleks mulai melepaskan proton melalui deprotonasi reaksi dengan bantuan spesies basa seperti amonia. Dalam pelarut berair, mekanismenya agak lebih rumit. Hidrolisis reversibel dari linker terjadi pada awalnya yang menghasilkan  $(\text{H}_2\text{mim})^+$  dan akibatnya meningkatkan pH. Kemudian kompleksasi Ion seng dengan penghubung Hmim terjadi bersamaan dengan hidrolisis terbalik karena konsumsi Hmim yang terus menerus dan pergeseran kesetimbangan pada sisi kiri reaksi hidrolisis. Itulah alasannya mengapa bagian ligan yang lebih tinggi diperlukan untuk memenuhi langkah deprotonasi dalam larutan berair untuk mencapai ZIF-8 murni [15].



### Peran Agen Deprotonasi

Pada rute sintesis berbasis air ini, 2-metilimidazol (2-MeIM) dapat di deprotonasi oleh pelarut berair (air), dan 2-MeIM yang di deprotonasi selanjutnya dikoordinasikan dengan  $Zn^{2+}$  untuk membentuk kerangka ZIF-8. Telah dilaporkan bahwa laju deprotonasi 2-MeIM mempengaruhi laju nukleasi dan pertumbuhan ZIF-8, yang memungkinkan kristalinitas dan morfologi ZIF-8 dikendalikan [17]. Laju deprotonasi 2-MeIM yang tinggi akan menghasilkan laju nukleasi ZIF-8 yang tinggi, yang juga mengarah pada pengendalian pertumbuhan kristal [17]. Misalnya, berbagai aditif seperti triethylamine [11], n-butylamine, sodium formate, 1-methylimidazole [12], ammonium hidroksida dan Natrium hidroksida [13] telah diperkenalkan ke dalam campuran sintesis ZIF-8 sebagai agen deprotonasi dan modulasi untuk meningkatkan hasil atau

memanipulasi ukuran kristal akhir dengan mengendalikan proses kristalisasi [18].

ZIF-8 (*Zeolitic Imidazolate Framework-8*) dengan rumus molekul  $C_8H_{12}N_4Zn$  disintesis dari  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (seng nitrat heksahidrat) sebagai sumber logam pusat yang terikat dengan (2-metilimidazol) sebagai senyawa organik dan air sebagai pelarut [19]. Penggunaan pelarut air dalam sintesis ZIF-8 saat ini sebagai pendekatan alternatif untuk mencapai hasil yang terkontrol, hasil tinggi, dan sintesis yang ramah lingkungan [4]. Tetapi penggunaan pelarut air saja dalam sintesis ZIF-8 masih kurang efektif dalam menghasilkan ZIF-8 yang baik, sehingga perlu agen deprotonasi dalam sintesis, beberapa senyawa yang biasa digunakan seperti Ammonium Hidroksida, Natrium hidroksida, Trietilenamina dan lain-lain. Adapun beberapa senyawa agen deprotonasi yang digunakan oleh para peneliti ditampilkan pada tabel 1.

**Tabel 1.** Agen deprotonasi, pelarut, ukuran kristal, luas permukaan, ukuran pori, volume pori, dan %rendemen digunakan pada sintesis ZIF-8

| Agen Deprotonasi   | Pelarut     | Ukuran Kristal (nm) | Luas Permukaan ( $m^2/g$ ) | Ukuran Pori | Volume Pori ( $cm^3/g$ ) | % R | referensi |
|--------------------|-------------|---------------------|----------------------------|-------------|--------------------------|-----|-----------|
| NH <sub>4</sub> OH | Air         | -                   | 1305,6                     | 1,67        | 0,56                     | -   | [15]      |
| NH <sub>4</sub> OH | metanol     | -                   | 1659,9                     | 1,72        | 0,69                     | -   | [15]      |
| TEA                | Air         | 45,7                | 1605                       | -           | 0,5543                   | 90  | [11]      |
| TEA                | Asam Asetat | 62,5                | 538                        | 1,62        | 0,4356                   | 32  | [20]      |
| NaOH               | Air         | -                   | 1300                       | 0,42        | 0,56                     | 65  | [21]      |
| NaOH               | Air         | 18                  | 1620                       | -           | -                        | 24  | [22]      |
| TMPAB              | Air         | 2,280               | 1539                       | -           | 0,6469                   | -   | [17]      |

Pada tabel 1 dijelaskan beberapa senyawa yang berperan dalam agen deprotonasi untuk mendapatkan hasil ZIF-8 yang baik, menjelaskan peran pelarut selama sintesis ZIF-8 adalah untuk memberikan kemampuan donasi ikatan hidrogen yang pada akhirnya mempengaruhi nukleasi dan laju kristalisasi, kemudian akan mempengaruhi ukuran kristalit [20]. Selain itu dampak jenis pelarut dan rasio

molar ligan/logam diteliti pada karakteristik akhir struktur ZIF-8 yang disintesis dengan menggunakan sintesis pada suhu kamar dan suhu tinggi. Dapat disimpulkan bahwa pelarut memiliki efek langsung pada kemurnian fase, kristalinitas, dan distribusi ukuran kristal. Sampel yang disintesis pada kondisi yang berbeda memiliki sifat tekstur yang serbaguna. ZIF-8 yang dihasilkan dari larutan metanol

pada suhu tinggi memiliki partikel yang lebih seragam dengan tingkat kristalinitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan ZIF-8 yang diperoleh dari larutan berair pada suhu kamar. Stabilitas termal fase sampel serupa dengan hanya sedikit perbedaan dalam kehilangan berat sampel ZIF-8 yang disiapkan dalam sistem berbasis air pada kisaran suhu 100–200°C. Mengikuti mekanisme pembentukan yang diusulkan untuk rute sintesis berbasis air dan metanol, perbedaan jumlah ligan yang dikonsumsi dan suhu sintesis dapat dikaitkan dengan hidrolisis ligan kompetitif dalam larutan berair terhadap pembentukan kompleks  $Zn(HmIm)_n$  [15].

Pada agen deprotonasi juga menghasilkan ukuran kristal yang cukup baik seperti dalam penelitian Khan et al., 2018 [11], Santoso et al., 2021 [20] dengan senyawa TEA (triethylamin) menghasilkan ZIF-8 dengan ukuran kristal 45,7 nm dan 62,5 nm. Selain itu pada penelitian García-Palacín et al., 2020 [22] dengan senyawa NaOH dengan ukuran kristal 18 nm dan penelitian Kenyotha et al., 2020 [17] dengan senyawa TMPAB (trimetil fenil ammonium bromida) dengan ukuran 2,280 nm. Ukuran kristal yang lebih kecil mempengaruhi luas permukaan suatu material, material berpori yang memiliki ukuran lebih kecil akan meningkatkan luas permukaan. Hal ini dikarenakan material yang lebih kecil akan meningkatkan volume pori dan ukuran pori sehingga sisi aktif dari suatu material juga bertambah. Sehingga hal ini penting terhadap situs aktif adsorpsi dan juga fleksibilitas material [23]. Selain itu juga Partikel ZIF-8 yang lebih kecil dengan luas permukaan eksternal yang lebih besar menunjukkan aktivitas katalitik yang baik.

Dilihat dari luas permukaan dari ZIF-8 yang dihasilkan, pada tabel 1 masing-masing senyawa agen deprotonasi menghasilkan luas permukaan yang baik, hanya saja pada senyawa TEA sebagai agen deprotonasi dengan menggunakan pelarut asam asetat dalam penelitian Santoso et al., 2021 [20] menghasilkan luas permukaan yang paling kecil diantara senyawa lain yaitu 538 m<sup>2</sup>/g. Hal ini dikarenakan sintesis menggunakan suhu yang cukup rendah yang dapat mengurangi laju nukleasi dan pertumbuhan kristal [24]. Luas permukaan yang relatif rendah juga dapat mengidentifikasi bahwa ZIF-8 yang disintesis masih mengandung beberapa penghubung 2-

metilimidazol yang tidak bereaksi sehingga dapat menurunkan kualitas ZIF-8. Kemudian pada data ukuran pori pada tabel 1 menyatakan bahwa senyawa  $NH_4OH$ , TEA, dan NaOH menghasilkan ukuran pori yang merupakan material mikropori. Dimana material mikropori ini memiliki ukuran pori < 2 nm dan memiliki luas permukaan yang cukup besar serta material ini baik untuk aktivasi adsorpsi. Material mikropori biasa termasuk didalam isoterm tipe I. isoterm tipe I ini memiliki ciri dapat meningkat dengan cepat pada tekanan relatif rendah dan akan melambat pada tekanan yang sedang.

### Aplikasi

ZIF-8 telah diaplikasikan dalam berbagai aplikasi, salah satunya aplikasi ZIF-8 adalah adsorpsi. Metode adsorpsi adalah metode penghilangan kontaminan melalui adsorben secara konsisten. Metode ini digunakan karena biaya yang relatif rendah, ramah lingkungan dan praktis. salah satunya adsorpsi yang diteliti adalah adsorpsi antibiotik. Antibiotik adalah kelas polutan organik baru yang banyak digunakan untuk mengobati penyakit manusia dan hewan, dan telah menarik banyak perhatian karena meningkatnya kejadian resistensi antibiotik [25]. Tetrasiklin (TC) adalah obat spektrum luas yang paling umum, antibiotik berbasis tetrasiklin ini banyak digunakan untuk mengobati infeksi bakteri dan sebagai aditif pakan untuk meningkatkan pertumbuhan hewan dalam berbagai akuakultur [26]. TC juga banyak digunakan sebagai obat hewan di peternakan, baik sebagai agen antibakteri atau promotor pertumbuhan untuk mencegah infeksi ternak [27]. Namun, Biasanya kurang dari 30% dosis antibiotik diserap oleh hewan dan Sisanya dilepaskan ke lingkungan melalui urin dan feses. Sehingga hal ini menarik perhatian para peneliti untuk mengurangi limbah TC. Luas permukaan, distribusi pori dan fungsionalitas permukaan merupakan karakteristik penting dari adsorben yang meningkatkan adsorpsi [20].

Selain sebagai adsorpsi antibiotik ZIF-8 juga biasa diaplikasikan di bidang katalis dalam pemisahan gas  $CO_2$ . Material ini dicirikan oleh stabilitas termal dan kimianya yang tinggi, yang merupakan keunggulan utama dibandingkan MOF lainnya. Selain itu pada penelitian Kenyotha et al., 2020 menjelaskan interaksi tambahan antara  $CO_2$ , pertukaran turunan imidazol akan meningkatkan luas permukaan,

ukuran pori dan volume pori saat pertukaran dengan turunan imidazol menghasilkan pemisahan CO<sub>2</sub> yang tinggi.

Untuk beberapa aplikasi tertentu, material ZIF-8 dapat dikompositkan dengan material lain untuk aktivitas yang lebih meningkat. Seperti pada penelitian N. Li et al., 2019 [25], ZIF-8 dikompositkan dengan La

Dimana La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> berhasil dimuat ke ZIF-8 dengan metode perendaman untuk membentuk lantanida komposit *Zeolitic Imidazolate Framework-8* (La@ZIF-8) yang mana material ini digunakan untuk adsorpsi fosfat dan menunjukkan hasil yang baik. Adapun aplikasi lain untuk ZIF-8 dijelaskan pada **tabel 2** dibawah ini

**Tabel 2.** Aplikasi ZIF-8

| Material                   | Aplikasi                                   | Referensi |
|----------------------------|--------------------------------------------|-----------|
| ZIF-8/nanorod ZnO          | Pemisahan gas                              | [28]      |
| ZIF-8 skala nano           | Adsorpsi kango merah                       | [29]      |
| ZIF-8                      | Menghilangkan logam berat dalam air        | [30]      |
| ZIF-8                      | Sensor Elektrokimia                        | [31]      |
| ZIF-8                      | Pengantar obat                             | [32]      |
| Ag@ZIF-8                   | Katalis                                    | [1]       |
| ZIF-8                      | Penghilangan minyak dari emulsi minyak/air | [33]      |
| Nanokomposit ZnO/CdS@ZIF-8 | degradasi fotokatalitik pewarna organik    | [34]      |
| ZIF-8                      | Preparasi Biodiesel                        | [35]      |
| ZIF-8                      | elektronik solid-state                     | [36]      |
| ZIF-8@BiPO <sub>4</sub>    | Penyimpanan Energi dan Aplikasi Lingkungan | [37]      |
| ZIF-8                      | Penangkapan dan Pemisahan CO <sub>2</sub>  | [38]      |
| ZIF-8 Nanokomposit         | Elektrokimia                               | [39]      |
| ZIF-8/Cu-TiO <sub>2</sub>  | Energi Surya                               | [40]      |
| ZIF-8                      | pengantar obat dan terapi tumor            | [41]      |
| ZIF-8@Rhodamine B          | Ekstraksi Polutan                          | [42]      |

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dalam artikel ini, dapat disimpulkan bahwa ZIF-8 adalah suatu material kristal yang terdiri dari ion seng (Zn) sebagai logam pusat yang dihubungkan dengan ligan 2-metilimidazol dan memiliki struktur porositas yang unik. Secara umum, penggunaan agen deprotonasi pada sintesis ZIF-8 dapat memberikan hasil kristal teratur dan berpori serta memberikan luas permukaan yang hampir sama dengan hasil sintesis ZIF-8 yang tanpa agen deprotonasi. Sehingga dapat mengurangi penggunaan pelarut organik yang cukup mahal dan kurang ramah lingkungan. Namun, dalam sintesis ZIF-8 dengan agen deprotonasi ini memiliki kelemahan yaitu ligan 2-metilimidazol belum bereaksi semua selama proses sintesis yang menyebabkan menurunnya kualitas ZIF-8 yang dihasilkan. ZIF-8 memiliki potensi aplikasi yang menjanjikan di berbagai bidang seperti bidang adsorpsi, katalis, pengantar obat dan pemisahan gas.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Shi et al., "Facile and Rapid Preparation of Ag@ZIF-8 for Carboxylation of Terminal Alkynes with CO<sub>2</sub> in Mild Conditions," *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, doi: 10.1021/acsami.9b07991.
- [2] L. Jiao, J. Y. R. Seow, W. S. Skinner, Z. U. Wang, and H. L. Jiang, "Metal-organic frameworks: Structures and functional applications," *Elsevier B.V.*, Jul. 01, 2019, doi: 10.1016/j.mattod.2018.10.038.
- [3] A. A. Pasban, A. Asghari, A. A. Miran Beigi, and M. Rajabi, "Synthesis and characterization of Ionic liquid supported on Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8) as a highly effective additive for visbreaking of petroleum vacuum bottom," *Afinidad*, vol. 81, no. 602, pp. 159–168, 2024, doi: 10.55815/428833.
- [4] D. Kim et al., "Surfactant-Free, Size-Controllable, and Scalable Green Synthesis of ZIF-8 Particles with Narrow

- Size Distribution by Tuning Key Reaction Parameters in Water Solvent,” *Small Methods*, 2024, doi: 10.1002/smt.202400236.
- [5] Y. R. Lee, M. S. Jang, H. Y. Cho, H. J. Kwon, S. Kim, and W. S. Ahn, “ZIF-8: A comparison of synthesis methods,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 271, pp. 276–280, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.cej.2015.02.094.
- [6] L. Bazzi, I. Ayouch, H. Tachallait, and S. EL Hankari, “Ultrasound and microwave assisted-synthesis of ZIF-8 from zinc oxide for the adsorption of phosphate,” *Results in Engineering*, vol. 13, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100378.
- [7] Q. Bao, Y. Lou, T. Xing, and J. Chen, “Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) in aqueous solution via microwave irradiation,” *Inorg Chem Commun*, vol. 37, pp. 170–173, 2013, doi: 10.1016/j.inoche.2013.09.061.
- [8] L. Hu, L. Chen, Y. Fang, A. Wang, C. Chen, and Z. Yan, “Facile synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) by forming imidazole-based deep eutectic solvent,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 268, pp. 207–215, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.micromeso.2018.04.039.
- [9] J. Chang *et al.*, “Cobalt nanoparticles embedded nitrogen doped carbon, preparation from alkali deprotonation assisted ZIF-67 and its electrocatalytic performance in oxygen evolution reaction,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 23, pp. 12787–12797, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.206.
- [10] K. Kida, M. Okita, K. Fujita, S. Tanaka, and Y. Miyake, “Formation of high crystalline ZIF-8 in an aqueous solution,” *CrystEngComm*, vol. 15, no. 9, pp. 1794–1801, Mar. 2013, doi: 10.1039/c2ce26847g.
- [11] I. U. Khan *et al.*, “Economical, environmental friendly synthesis, characterization for the production of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanoparticles with enhanced CO<sub>2</sub> adsorption,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 11, no. 7, pp. 1072–1083, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.arabj.2018.07.012.
- [12] J. Cravillon, R. Nayuk, S. Springer, A. Feldhoff, K. Huber, and M. Wiebcke, “Controlling zeolitic imidazolate framework nano- and microcrystal formation: Insight into crystal growth by time-resolved in situ static light scattering,” *Chemistry of Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 2130–2141, Apr. 2011, doi: 10.1021/cm103571y.
- [13] M. A. Molina, J. Rodríguez-Campa, R. Flores-Borrell, R. M. Blanco, and M. Sánchez-Sánchez, “Sustainable Synthesis of Zeolitic Imidazolate Frameworks at Room Temperature in Water with Exact Zn/Linker Stoichiometry,” *Nanomaterials*, vol. 14, no. 4, Feb. 2024, doi: 10.3390/nano14040348.
- [14] P. Y. Moh, P. Cubillas, M. W. Anderson, and M. P. Attfield, “Revelation of the molecular assembly of the nanoporous metal organic framework ZIF-8,” *J Am Chem Soc*, vol. 133, no. 34, pp. 13304–13307, Aug. 2011, doi: 10.1021/ja205900f.
- [15] M. Malekmohammadi, S. Fatemi, M. Razavian, and A. Nouralishahi, “A comparative study on ZIF-8 synthesis in aqueous and methanolic solutions: Effect of temperature and ligand content,” *Solid State Sci*, vol. 91, pp. 108–112, May 2019, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2019.03.022.
- [16] X. Chen, X. Jiang, C. Yin, B. Zhang, and Q. Zhang, “Facile fabrication of hierarchical porous ZIF-8 for enhanced adsorption of antibiotics,” *J Hazard Mater*, vol. 367, pp. 194–204, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.080.
- [17] K. Kenyotha, K. C. Chanapatttharapol, S. McCloskey, and P. Jantaharn, “Water based synthesis of ZIF-8 assisted by hydrogen bond acceptors and enhancement of CO<sub>2</sub> uptake by solvent assisted ligand exchange,” *Crystals (Basel)*, vol. 10, no. 7, pp. 1–23, Jul. 2020, doi: 10.3390/cryst10070599.
- [18] 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.

- [19] Irfiatun dan R. E. Nadifah, "Pengaruh Perbandingan Logam-Ligan dan Sintesis Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8) secara Solvothermal," 2015.
- [20] E. Santoso *et al.*, "Facile synthesis of ZIF-8 nanoparticles using polar acetic acid solvent for enhanced adsorption of methylene blue," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 310, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.micromeso.2020.110620.
- [21] H. N. Abdelhamid, "Zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8, ZIF-67, and ZIF-L) for hydrogen production," *Appl Organomet Chem*, vol. 35, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.1002/aoc.6319.
- [22] M. García-Palacín *et al.*, "Sized-Controlled ZIF-8 Nanoparticle Synthesis from Recycled Mother Liquors: Environmental Impact Assessment," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 8, no. 7, pp. 2973–2980, Feb. 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b07593.
- [23] C. L. Hobday, S. Krause, S. M. J. Rogge, J. D. Evans, and H. Bunzen, "Perspectives on the Influence of Crystal Size and Morphology on the Properties of Porous Framework Materials," *Front Chem*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.772059.
- [24] A. F. Gross, E. Sherman, and J. J. Vajo, "Aqueous room temperature synthesis of cobalt and zinc sodalite zeolitic imidazolate frameworks," *Dalton Transactions*, vol. 41, no. 18, pp. 5458–5460, May 2012, doi: 10.1039/c2dt30174a.
- [25] N. Li, L. Zhou, X. Jin, G. Owens, and Z. Chen, "Simultaneous removal of tetracycline and oxytetracycline antibiotics from wastewater using a ZIF-8 metal organic-framework," *J Hazard Mater*, vol. 366, pp. 563–572, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.047.
- [26] H. Voje Petković, T. Lukežić, and J. Šušković, "Biosynthesis of Oxytetracycline by *Streptomyces rimosus*," *Food Technol. Biotechnol*, vol. 55, no. 1, pp. 3–13, 2017, doi: 10.17113/ft.
- [27] J. Rivera-Utrilla, C. V. Gómez-Pacheco, M. Sánchez-Polo, J. J. López-Peñalver, and R. Ocampo-Pérez, "Tetracycline removal from water by adsorption/bioadsorption on activated carbons and sludge-derived adsorbents," *J Environ Manage*, vol. 131, pp. 16–24, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.09.024.
- [28] Y. Li, C. Ma, P. Nian, H. Liu, and X. Zhang, "Green synthesis of ZIF-8 tubular membranes from a recyclable 2-methylimidazole water-solvent solution by ZnO nanorods self-converted strategy for gas separation," *J Memb Sci*, vol. 581, pp. 344–354, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.memsci.2019.03.069.
- [29] X. Qiang Cao, X. Wang, M. Chen, F. Xiao, Y. Meng Huang, and X. Jun Lyu, "Synthesis of nanoscale zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) using reverse micro-emulsion for Congo red adsorption," *Sep Purif Technol*, vol. 260, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.118062.
- [30] K. Li *et al.*, "Sustainable application of ZIF-8 for heavy-metal removal in aqueous solutions," Jan. 02, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/su13020984.
- [31] A. Paul, I. K. Banga, S. Muthukumar, and S. Prasad, "Engineering the ZIF-8 Pore for Electrochemical Sensor Applications-A Mini Review," Aug. 09, 2022, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acsomega.2c00737.
- [32] S. Feng, X. Zhang, D. Shi, and Z. Wang, "Zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) for drug delivery: A critical review," Apr. 01, 2021, *Higher Education Press Limited Company*. doi: 10.1007/s11705-020-1927-8.
- [33] T. S. B. Barbosa, T. R. B. Barros, T. L. A. Barbosa, D. P. A. Rodrigues, and M. G. F. Rodrigues, "Oil removal from oil/water emulsion by Zeolitic Imidazolate Framework-8 (ZIF-8): A study of pH, and adsorption kinetic," *Research, Society and Development*, vol. 10, no. 14, p. e444101422162, Nov. 2021, doi: 10.33448/rsd-v10i14.22162.
- [34] R. M. Kong, Y. Zhao, Y. Zheng, and F. Qu, "Facile synthesis of ZnO/CdS@ZIF-8 core-shell nanocomposites and their applications in photocatalytic degradation of organic dyes," *RSC Adv*, vol. 7, no. 50, pp. 31365–31371, 2017, doi: 10.1039/c7ra03918b.
- [35] M. Adnan, K. Li, J. Wang, L. Xu, and Y. Yan, "Hierarchical ZIF-8 toward immobilizing *Burkholderia cepacia*

- lipase for application in biodiesel preparation,” *Int J Mol Sci*, vol. 19, no. 5, May 2018, doi: 10.3390/ijms19051424.
- [36] A. M. Aboraia *et al.*, “Structural characterization and optical properties of zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8) for solid-state electronics applications,” *Opt Mater (Amst)*, vol. 100, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.optmat.2019.109648.
- [37] S. Yetiman, S. Karagoz, F. Kilic Dokan, M. S. Onses, E. Yilmaz, and E. Sahmetlioglu, “Rational Integration of ZIF-8 and BiPO<sub>4</sub> for Energy Storage and Environmental Applications,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 49, pp. 44878–44891, Dec. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c04835.
- [38] X. Gong, Y. Wang, and T. Kuang, “ZIF-8-Based Membranes for Carbon Dioxide Capture and Separation,” Dec. 04, 2017, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b03613.
- [39] M. Jiang, X. Cao, D. Zhu, Y. Duan, and J. Zhang, “Hierarchically Porous N-doped Carbon Derived from ZIF-8 Nanocomposites for Electrochemical Applications,” *Electrochim Acta*, vol. 196, pp. 699–707, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.electacta.2016.02.094.
- [40] H. A. Yurtsever and A. E. Çetin, “Fabrication of ZIF-8 decorated copper doped TiO<sub>2</sub> nanocomposite at low ZIF-8 loading for solar energy applications,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 625, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.126980.
- [41] Q. Wang, Y. Sun, S. Li, P. Zhang, and Q. Yao, “Synthesis and modification of ZIF-8 and its application in drug delivery and tumor therapy,” Oct. 12, 2020, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d0ra07950b.
- [42] E. W. P. Moore and F. Maya, “ZIF-8@Rhodamine B as a Self-Reporting Material for Pollutant Extraction Applications,” *Nanomaterials*, vol. 13, no. 5, Mar. 2023, doi: 10.3390/nano13050842.