

STUDI LITERATUR SINTESIS MATERIAL *METAL-ORGANIC FRAMEWORKS-5* (MOF-5) MENGGUNAKAN METODE SOLVOTERMAL DAN APLIKASINYA

LITERATURE REVIEW OF SYNTHESIS OF METAL-ORGANIC FRAMEWORKS-5 (MOF-5) USING SOLVOTHERMAL METHOD AND THEIR APPLICATION

Arsy Aprilia Mid, Husna Syaima*, Noor Hindryawati

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

Diterbitkan: 23 April 2024

ABSTRACT

This review article endeavours to comprehensively gather, compare, and scrutinize recent studies pertaining to the solvothermal synthesis of MOF-5 and its diverse applications. MOF-5 with the molecular formula $Zn_4O(BDC)_3$ which can be synthesized from a metal salt of zinc (Zn) with its organic ligands 1,4-benzene dicarboxylic acid (BDC) or terephthalic acid. In the last recent years, research on MOF-5 has continued to evolve and a variety of different synthesis methods have been tested. The synthesis process generally involves the use of polar organic solvents, such as N,N-diethylformamide (DEF) or N,N-dimethylformamide (DMF) at high temperatures and pressures. The solvothermal method is the most frequently used technique and allows good control over crystal size, morphology, and surface area. Factors such as solvent, temperature, reaction time, and metal/ligand ratio affect the properties of the resulting MOF-5 crystal. MOF-5 is widely applied as a drug carrier material in drug *delivery systems*. MOF-5 has a high surface area that supports drug loading efficiency and significant hydrogen storage capacity. In addition, MOF-5's ability to release guest molecules in a controlled manner makes it an attractive choice for continuous applications. MOF-5 is also used in a variety of other applications including liquid and gas separation, catalysis, and adsorption. Research on modifying the structure of MOF-5 continues to evolve to meet the needs of increasingly diverse applications.

Keywords : Synthesis, Terephthalic Acid, MOF-5, Solvothermal

PENDAHULUAN

Metal-Organic Frameworks (MOFs) adalah sejenis nanomaterial berpori yang dibentuk *self-assembly* oleh berbagai ligan organik dan pusat logam [1]. Metal-Organic Frameworks biasanya mengandung logam atau kluster logam yang dihubungkan oleh linker (penghubung) organik [2]. Karena luas permukaannya yang sangat besar dan porositas yang dapat dikontrol, MOF mendapatkan perhatian sebagai bahan canggih yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi, seperti di bidang energi [3], farmasi [5], industri, dan lingkungan [22]. Ada berbagai metode dalam sintesis MOF. Metode yang dapat digunakan untuk mensintesis MOF adalah metode kopresipitasi, elektrokimia, sonokimia, mekanokimia, *reverse microemulsion*, solvothermal/hidrotermal [4], pencampuran langsung dengan TEA, *slow diffusion* menggunakan TEA, sintesis pada suhu ruang [21] *microwave* dan sonikasi [24].

Metal-Organic Frameworks-5 (MOF-5) telah menjadi fokus penelitian yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir sebagai prekursor penting untuk sintesis MOF dan memiliki potensi dalam berbagai aplikasi [6]. Sifat struktural dan porositasnya memungkinkan berbagai kegunaan dalam berbagai domain ilmiah, termasuk penyimpanan gas, pemisahan molekul, katalisis, dan banyak lagi [10]. MOF-5 memiliki struktur dasar yang terdiri dari ion logam pusat seng (Zn) yang terikat pada ligan organik 1,4-*benzene dicarboxyl acid* (BDC) atau asam tereftalat [7]. Struktur ini membentuk tatanan kristal dengan pori-pori besar yang sangat teratur yang memungkinkan penyerapan gas atau molekul lain di mana MOF-5 adalah salah satu spesimen MOF yang menonjol karena luas permukaannya yang tinggi dan pori-pori yang relatif besar yang terkenal dengan perilaku penyimpanan hidrogennya [8].

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



Salah satu prosedur yang paling menarik dan penting dalam bidang kimia dan ilmu material adalah sintesis solvotermal pada MOF-5 [3]. Sintesis MOF dengan metode solvotermal dapat dilakukan dengan microwave atau pemanasan konvensional. Dalam metode solvotermal, peningkatan suhu reaksi menyebabkan terjadinya transformasi prekursor sebelum pembentukan MOF [9].

Oleh karena itu, pada artikel review ini akan dibahas mengenai sintesis MOF-5 dengan menggunakan metode solvotermal dari berbagai penelitian sebelumnya. Selain itu juga akan dibahas beberapa aplikasi MOF-5 dan teknik karakterisasi yang umum digunakan dalam studi sintesis MOF.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam mini review ini adalah studi literatur penelitian-penelitian yang membahas tentang pembuatan MOF-5 dengan menggunakan metode solvotermal serta penelitian analisis struktur dan sifat termal MOF-5 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 pembuatan dan karakterisasi MOF-5 menggunakan metode solvotermal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur MOF-5

Metal-Organic Framework-5 (MOF-5) adalah material kristal yang terkenal dan diteliti secara ekstensif dengan struktur porositas unik [5]. MOF terdiri dari ligan organik dan ion logam atau kluster yang disusun dalam jaringan tiga dimensi. Ion seng (Zn) pada inti gugus oktahedral, dihubungkan oleh ligan 1,4-benzena dikarboksilat (BDC), merupakan elemen struktural dasar MOF-5 [7]. Dengan berfungsi sebagai jaringan ikat atau *linker* antara ion logam, ligan organik ini membentuk kerangka yang sangat berpori dan terbuka [14]. MOF-5 sering diaplikasikan dalam penyerapan dan penyimpanan gas termasuk karbon dioksida, metana, dan hidrogen karena luas permukaannya yang luas dan ukuran pori yang dapat disesuaikan [2].

MOF-5 dengan rumus molekul $Zn_4O(BDC)_3$ disintesis dari $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (seng nitrat heksahidrat) sebagai bahan anorganik yang terkait dengan H_2BDC (asam dikarboksilat 1,4-benzena) sebagai penghubung organik dan DEF (N,N-dietilformamida) atau DMF (N,N-dimetilformamida) sebagai pelarut [24]. DEF lebih disukai sebagai pelarut reaksi meskipun DMF dapat digunakan sebagai pengganti fase ekuivalen tetapi mendapatkan kualitas yang lebih rendah dan harga yang lebih murah [9]. Namun, berbagai garam logam seng juga dapat digunakan misalnya $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, $Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, atau $ZnCl$ [24].

Unit Zn_4O bergabung dengan ligan BDC linier (BDC = asam benzenedikarboksilat) untuk membuat jaringan kubik membentuk MOF-5, yang pertama kali dijelaskan pada tahun 1999 [11]. Karena kinetika adsorpsi hidrogen reversibel dan ketahanan yang besar, ini adalah salah satu MOF yang paling banyak diselidiki. Dalam keadaan sintesis ideal, luas permukaan Brunauer-Emmett-Teller (BET) maksimum yang didokumentasikan untuk MOF-5 adalah sekitar $3800 \text{ m}^2/\text{g}$ [12]. Menurut penelitian Kaye et al. (2007), MOF-5 memiliki kapasitas gravimetri total 11,5 persen berat pada 77 K dan tekanan tinggi 170 bar [12]. Selain karena luas permukaan yang besar, MOF-5 banyak dikembangkan karena berbagai keunggulan sifat fisika dan kimianya. Keunggulan-keunggulan lainnya di antaranya: MOF-5 bermanfaat untuk penggunaan seperti pengiriman obat dan katalisis karena ukuran porinya yang besar yang dapat mengakomodasi molekul yang lebih besar [2]. MOF-5 adalah bahan yang hemat biaya untuk aplikasi skala besar karena dapat diproduksi dari prekursor yang murah dan mudah diakses seperti asam tereftalat dan seng nitrat heksahidrat [2]. Selain itu, struktur MOF-5 dapat disesuaikan, memungkinkan sifat-sifatnya disesuaikan dengan aplikasi spesifik dengan mengubah jenis ion logam dan penghubung organik yang digunakan dalam sintesisnya [23] serta MOF-5 dapat digunakan dalam aplikasi biomedis seperti pengiriman obat karena tidak beracun dan biokompatibel [20].

Sintesis MOF-5 Dengan Metode Solvotermal

Metode solvotermal adalah teknik sintesis yang berguna untuk MOF-5 yang menghasilkan bahan dengan struktur kristal teratur dan berpori [22]. Sintesis solvotermal adalah teknik yang secara akurat mengontrol suhu dan tekanan saat melibatkan proses kimia dalam lingkungan terbatas [17]. Kontrol yang sangat baik atas produksi struktur MOF dengan ukuran pori dan luas permukaan yang diinginkan sangat memungkinkan dengan metode ini [14]. Tujuan pengembangan metode sintesis MOF-5 adalah untuk menghasilkan bahan dengan volume pori dan luas permukaan yang besar [7]. Karena kristal MOF-5 dengan

kristalinitas tinggi, luas permukaan yang besar, dan volume pori telah dibuat, pendekatan solvotermal sering digunakan [5]. Faktor reaksi, termasuk suhu, durasi, rasio logam atau ligan, komposisi pelarut, dan pH larutan, semuanya mempengaruhi sifat kristal MOF-5 yang diperoleh [24].

Metode solvotermal adalah teknik paling praktis untuk dilakukan di mana MOF dapat disintesis dengan reaksi kimia antara ligan organik seperti hidrokarbon yang berfungsi sebagai asam karboksilat dan garam anorganik sebagai suplai ion logam dalam pelarut organik polar pada suhu dan tekanan tinggi [23]. MOF-5 dengan rumus molekul $Zn_4O(BDC)_3$ disintesis dari garam logam seng sebagai bahan anorganik yang terkait dengan H_2BDC (asam dikarboksilat 1,4-benzena) sebagai penghubung organik dan DEF (N,N'-diethylformamida) atau DMF (N,N'-dimethylformamida) sebagai pelarut. DEF lebih disukai sebagai pelarut reaksi meskipun DMF dapat digunakan sebagai pengganti fase ekuivalen tetapi mendapatkan kualitas yang lebih rendah dan harga yang lebih murah. Sintesis MOF-5 dengan metode solvotermal dalam berbagai kondisi disebutkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pelarut, suhu, dan waktu yang digunakan pada sintesis solvotermal MOF-5

Referensi	Pelarut/katalis	Suhu (°C)	Waktu (jam)	Ukuran/volume pori	Luas permukaan (m ² /g)
[14]	DMF/TEA	100	20	24.5 Å	638
[17]	DMF/TEA	120	24	0.48 cm ³ /g 25.7 Å	713
[18]	DMF	100	22	0.383 cm ³ /g	921
[20]	DEF	135	24	0.2918 cm ³ /g	1580.35
[24]	DEF	100	20	-	1874
[26]	DMF	120	12	0.32 cm ³ /g	638.4
	Air	140	12	0.36 cm ³ /g	734.9
		160	12	0.34 cm ³ /g	685.7
[27]	NMP	105	22	-	1263
[28]	DEF	90	24	1.39 cm ³ /g	2449
[29]	DMF	130	2	0.86 cm ³ /g	2304

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, kondisi reaksi mempengaruhi hasil sintesis MOF-5. Pada umumnya, pelarut yang digunakan dalam sintesis MOF-5 adalah DMF. Hal ini berkaitan dengan dengan kelarutan BDC dalam pelarut tersebut. Namun, banyak penelitian yang menggunakan variasi pelarut lainnya atau campuran pelarut dalam sintesis MOF-5 menggunakan metode solvotermal diantaranya air, DMF/air, DMF/etanol, *1-methyl-2-pyrrolidinone* (NMP) dll. Banyak digunakan pelarut N,N'-dimethylformamide (DMF) alih-alih N,N'-diethylformamida (DEF) sebagai pelarut alternatif pada sintesis MOF-5 dalam jumlah besar dan hemat biaya di mana rata-rata luas permukaan khusus MOF-5 yang disintesis dalam DMF berada di kisaran 600-1300 m²/g [27]. Adapun TEA berfungsi sebagai modulator selama proses sintesis. Karena TEA adalah bahan kimia organik dasar, hal ini mempengaruhi pH larutan reaksi, yang membantu mengatur nukleasi MOF-5 dan pengembangan kristal sehingga mempengaruhi bentuk material MOF-5 akhir dan distribusi ukuran partikel [14]. jenis pelarut yang digunakan untuk aktivasi sampel, serta kondisi penyimpanan dapat sangat mempengaruhi luas permukaan bahan MOF. Misalnya, menggunakan DMF sebagai pelarut alternatif yang lebih murah daripada DEF, telah menghasilkan produk MOF dengan luas permukaan yang lebih rendah [24]. Pada penelitian Saha et al. [28] dan Sabouni et al. [24] melaporkan Luas permukaan BET sampel MOF-5 yang disintesis dengan DEF adalah 2449 m²/g dan 1874 m²/g, di mana lebih tinggi dari nilai luas permukaan BET yang dilaporkan oleh Ata-ur-Rehman et al. [17], Ubaidullah et al. [14], dan Peedikakkal & Aljund [18] yang menggunakan DMF sebagai pelarut yaitu sebesar 728 m²/g, 638 m²/g, dan 921 m²/g. Kemudian sama dengan apa yang dilaporkan oleh Wang et al. [26] yang menggunakan DMF dan air sebagai pelarut menghasilkan luas permukaan yang lebih kecil yaitu 638-735 m²/g. Hasil karakterisasi BET luas area permukaan spesifik MOF-5 dengan menggunakan pelarut DEF dalam penelitian sebelumnya menunjukkan lebih dari tiga kali lebih besar daripada MOF-5 yang disintesis dengan pendekatan DMF, dan ukuran pori rata-rata MOF-5 dengan pendekatan DEF sekitar tujuh kali lebih kecil daripada sampel MOF-5 yang disintesis dengan DMF sebagai pelarut dalam penelitian sebelumnya, Namun masih ada faktor lain yang mempengaruhi hasil tersebut [28].

Selain pelarut, penggunaan suhu juga berpengaruh. Suhu yang sering digunakan dalam metode ini adalah 100°C atau lebih. Hal ini bertujuan untuk mempercepat reaksi kimia yang terlibat dalam pembentukan MOF [17]. Suhu yang tinggi mendorong pembubaran prekursor logam dan penghubung (*linker*) organik dalam pelarut, yang mengarah ke peningkatan reaktivitas dan nukleasi dan pertumbuhan kristal MOF yang lebih cepat [16]. Penggunaan suhu tinggi dalam sintesis solvotermal juga dapat membantu dalam mencapai ukuran kristal, morfologi, dan kemurnian produk MOF yang diinginkan [18] dan memungkinkan manipulasi porositas dan luas permukaan bahan MOF yang merupakan sifat penting untuk berbagai aplikasi seperti penyimpanan gas, katalisis, dan adsorpsi [15]. Penelitian Tri et al. [25] melaporkan data SEM, MOF-5 dengan morfologi kubus terbentuk di bawah tiga kondisi solvotermal yang berbeda: 105 °C selama 144 jam, 120 °C selama 24 jam, dan 140 °C selama 12 jam. MOF-5 pada suhu solvotermal 140 °C selama 12 jam menunjukkan ukuran kristal terkecil (85-95 µm) dan bentuk permukaan terbaik. Selain itu, penelitian Wang et al. [26] menunjukkan pola XRD kristal MOF-5 yang disintesis menggunakan metode solvotermal di mana *strong peaks* pada 6,8°, 9,6°, 13,8°, 19,8° dan 29,8° dalam pola XRD kristal MOF-5 menunjukkan puncak difraksi karakteristik kristal MOF-5 yang konsisten dengan hasil penelitian Ming et al [30], MOF-5 disintesis pada suhu yang berbeda dari 120°C, 140°C, dan 160°C, selama 12 jam tetapi intensitas puncak difraksi melemah dan muncul pada 19,8° yang menunjukkan bahwa suhu sintesis 140°C lebih baik.

Waktu yang digunakan pada proses sintesis solvotermal juga memiliki dampak besar pada nukleasi, pertumbuhan, dan kristalisasi umum MOF-5 [11]. Waktu yang lebih lama biasanya memungkinkan kerangka waktu yang lebih lama untuk nukleasi dan pertumbuhan kristal, yang dapat menyebabkan kristal lebih besar dan bentuk kristal berubah. Di sisi lain, karena nukleasi dan tingkat perkembangannya yang lebih pendek, waktu reaksi yang lebih cepat dapat menghasilkan penciptaan kristal yang lebih kecil [16]. Dengan memodifikasi dan memahami efek durasi sintesis dapat lebih menyesuaikan karakteristik MOF-5 untuk penggunaan tertentu. Struktur, kristalinitas, dan sifat material dapat disesuaikan untuk mencapai karakteristik yang diinginkan, seperti peningkatan luas permukaan, peningkatan stabilitas, dan fungsi khusus yang cocok untuk berbagai aplikasi [21]. Ubaidullah et al. [14] Melakukan sintesis MOF-5 pada suhu 100°C selama 20 jam menghasilkan luas permukaan spesifik 939 m²/g di mana 75 kali lebih besar daripada luas permukaan nanopartikel ZnO murni. Porositas dan luas permukaan MOF-5 dipengaruhi oleh faktor waktu selama sintesis solvotermal. Pembentukan pori-pori dalam suatu material dapat dipengaruhi oleh berbagai waktu reaksi, yang karenanya dapat mempengaruhi fitur permukaan material dan kemampuan adsorpsi [14]. Penelitian Tri et al. [25] melaporkan pola difraktogram kristal yang diperoleh pada suhu pemanasan 140°C dengan optimasi waktu selama 12, 24, dan 144 jam menunjukkan puncak simulasi MOF-5, yaitu pada 6,8; 9,6; 13,7 dan 15,4°. Puncak tersebut masih muncul pada difraktogram kristal yang disintesis pada 140°C selama 24 dan 144 jam, meskipun intensitas puncak menurun dengan bertambahnya waktu pemanasan. Oleh karena itu, berdasarkan kristalinitas kristal yang diperoleh, waktu solvotermal terbaik untuk sintesis MOF-5 pada suhu 140°C adalah 12 jam [25]. Hal ini membuktikan bahwa lama waktu yang digunakan dapat mempengaruhi hasil sintesis.

Meskipun metode solvotermal secara luas telah digunakan untuk sintesis MOF-5, namun metode ini memiliki beberapa kekurangan. Rasio molar logam/ligan yang tinggi dalam proses solvotermal adalah salah satu kelemahannya, karena dapat mengakibatkan pembentukan pengotor dan menurunkan kualitas kristal MOF-5 yang diperoleh [25]. Suhu reaksi tinggi yang diperlukan untuk teknik solvotermal dapat bervariasi dari 105°C hingga 140°C [17]. Dalam hal penggunaan energi dan masalah keamanan, hal ini mungkin merugikan. Selain itu, Sifat kristal MOF-5 yang dihasilkan oleh proses solvotermal tergantung pada sejumlah faktor reaksi, termasuk pH larutan, komposisi pelarut, rasio logam/ligan, suhu reaksi, dan durasi reaksi [25]. Karena itu, sangat sulit mendapatkan hasil yang konsisten dan optimal.

Aplikasi MOF-5

MOF-5 telah dipalikhaskan dalam berbagai bidang. Salah satu aplikasi MOF-5 adalah sebagai material pembawa obat (*drug delivery system*). Dalam pemuatan obat (*drug loading*), MOF-5 berfungsi sebagai matriks di mana agen terapeutik atau obat dapat dienkapsulasi dalam struktur porinya [19]. Luas permukaan yang tinggi dan ukuran pori MOF-5 yang dapat disetel memungkinkan pemuatan molekul obat yang efisien. Proses enkapsulasi ini membantu melindungi obat dari degradasi dan meningkatkan stabilitasnya selama penyimpanan dan transportasi [20]. Pelepasan obat dari MOF-5 dapat dikontrol dan dipertahankan dari waktu ke waktu. Sifat unik MOF-5, seperti kemampuannya untuk menjalani pelepasan molekul tamu terkontrol, menjadikannya pilihan yang menarik untuk pelepasan obat berkelanjutan. Tingkat pelepasan

dapat disesuaikan dengan menyesuaikan sifat-sifat struktur MOF-5 atau dengan memodifikasi molekul obat yang dienkapsulasi [16].

Selain sebagai pemuatan obat, MOF-5 juga dapat digunakan sebagai penyimpanan hidrogen. Salah satu keunggulan utama MOF-5 untuk penyimpanan hidrogen adalah struktur kristalnya, yang memiliki pori-pori berukuran nanometer serta luas permukaan tinggi. [13] Luas permukaan dan porositas yang sangat besar ini sangat memungkinkan MOF-5 untuk menyerap dan menyimpan sejumlah besar hidrogen secara fisik [18]. Dalam konteks ini, hidrogen dapat diserap ke dalam pori-pori MOF-5 dengan cara yang mirip dengan gas yang direndam oleh spons [2]. Kemampuan MOF-5 untuk mengikat dan melepaskan hidrogen secara reversibel menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk digunakan dalam penyimpanan hidrogen [12].

Untuk beberapa aplikasi tertentu, MOF-5 dapat dikompositkan dengan material lain agar aktivitasnya lebih meningkat. Misalnya pada penelitian Katoch et al. [34], MOF-5 didoping dengan Ni di mana pada pengukuran *photoluminescence* (PL) menunjukkan perilaku *luminescence* MOF-5 dan *Ni-doped* MOF-5. Nitrogen dioksida (NO₂) berhasil deteksi oleh sampel *Ni-doped* MOF-5, yang merupakan indikasi yang jelas bagi MOF-5 untuk berperilaku sebagai sensor kimia berbasis adsorpsi.

Tabel 2. Aplikasi MOF-5

Material/komposit	Aplikasi	Referensi
MOF-5/poly-mer monolith	Meningkatkan pemisahan kromatografi cair kapiler homolog benzena	[1]
CH ₃ /MOF-5, Br/MOF-5, OH/ MOF-5 CH ₂ CH/MOF-5	Pengantar obat (<i>drug delivery</i>)	[19]
MOF-5	Penyimpanan dan pengantar (<i>drug delivery and release</i>) berkelanjutan obat antitumor Oridonin	[20]
MOF-5	<i>Membrane reverse</i> osmosis untuk desalinasi air laut	[22]
NP-C-MOF-5 (nitrogen, fosfor dan karbon/ MOF-5)	Sintesis Ammonia	[32]
Fe(III)/ MOF-5(Ni)	Sintesis catechol dari fenol	[33]
Ni/MOF-5	Pendeteksi NO ₂	[34]
MOF-5	Pendeteksi pestisida <i>organophosphate</i>	[35]
Ion lantanida /MOF-5	Sensor suhu	[36]

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dalam artikel ini, dapat disimpulkan bahwa MOF-5 adalah suatu material kristal yang terdiri dari ion seng (Zn) pada inti gugus oktahedral, dihubungkan oleh ligan 1,4-benzena dikarboksilat (BDC) dan memiliki struktur porositas unik. Secara umum, metode solvotermal sering digunakan untuk sintesis MOF-5 di mana metode solvotermal adalah teknik sintesis yang berguna untuk MOF-5 yang menghasilkan bahan dengan struktur kristal teratur dan berpori serta secara akurat dapat mengontrol suhu dan tekanan saat melibatkan proses kimia namun rasio molar logam/ligan yang tinggi dalam proses solvotermal adalah salah satu kelemahannya, karena dapat mengakibatkan pembentukan pengotor dan menurunkan kualitas kristal MOF-5 yang diperoleh di mana metode solvotermal dipengaruhi oleh beberapa kondisi seperti jenis pelarut, suhu, dan waktu sintesis. MOF-5 memiliki potensi aplikasi yang menjanjikan di berbagai bidang, seperti bidang energi, farmasi, industri, dan lingkungan sebagai penyimpanan hidrogen dan pengantar obat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peng, X. J. & Wu, S.B., (2023). Incorporation Of Metal-Organic Framework Mofs-5 Into The Polymer Monolith Via The Surface Covalent Immobilization Method For Enhanced Capillary Liquid Chromatographic Separation Of Benzene Homologues. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 51(5), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.cjac.2022.100199>
- [2] Khair, M. (2011). Sintesis *Metal-Organic Framework* (MOF) Untuk Penyimpan Hidrogen. *EKSAKTA*. 1, 38-45.

- [3] Ren, J., Dyosiba, X., Musyoka, N. M., Langmi, H. W., North, B. C., Mathe, M., & Onyango, M. S. (2016). Green synthesis of chromium-based metal-organic framework (Cr-MOF) from waste polyethylene terephthalate (PET) bottles for hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(40), 18141–18146. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.040>
- [4] Semyonov, O., Chaemchuen, S., Ivanov, A., Verpoort, F., Kolska, Z., Syrtanov, M., Svorcik, V., Yusubov, M. S., Lyutakov, O., Guselnikova, O., & Postnikov, P. S. (2021). Smart recycling of PET to sorbents for insecticides through in situ MOF growth. *Applied Materials Today*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100910>
- [5] Hanif, Q. A., Nugraha, R. E., & Lestari, W. W. (2018). Kajian Metal–Organic Frameworks (MOFS) sebagai Material Baru Pengantar Obat. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 14(1), 16–36. <https://doi.org/10.20961/alchemy.14.1.8218.16-36>
- [6] Song, J., Liu, L., & Hong, Y. (2022). High interfacial resistances of CH₄ and CO₂ transport through Metal-Organic framework 5 (MOF-5). *Separation and Purification Technology*, 301. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2022.121895>
- [7] Al-Enizi, A. M., Ubaidullah, M., Ahmed, J., Ahamad, T., Ahmad, T., Shaikh, S. F., & Naushad, M. (2020). Synthesis of NiOx@NPC composite for high-performance supercapacitor via waste PET plastic-derived Ni-MOF. *Composites Part B: Engineering*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107655>
- [8] Mirsoleimani-Azizi, S. M., Setoodeh, P., Zeinali, S., & Rahimpour, M. R. (2018). Tetracycline antibiotic removal from aqueous solutions by MOF-5: Adsorption isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6118–6130. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.017>
- [9] Wei, X., Li, Y., Peng, H., Gao, D., Ou, Y., Yang, Y., Hu, J., Zhang, Y., & Xiao, P. (2019). A novel functional material of Co₃O₄/Fe₂O₃ nanocubes derived from a MOF precursor for high-performance electrochemical energy storage and conversion application. *Chemical Engineering Journal*, 355, 336–340. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.009>
- [10] Dermanaki Farahani, S., & Zolgharnein, J. (2022). Removal of Alizarin red S by calcium-terephthalate MOF synthesized from recycled PET-waste using Box-Behnken and Taguchi designs optimization approaches. *Journal of Solid State Chemistry*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123560>
- [11] Li, H., Eddaoudi, M., O’Keeffe, M., & Yaghi, M. (1999). Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework. *NATURE*, 402, 276–279.
- [12] Kaye, S. S., Dailly, A., Yaghi, O. M., & Long, J. R. (2007). Impact of preparation and handling on the hydrogen storage properties of Zn₄O(1,4-benzenedicarboxylate)₃ (MOF-5). *Journal of the American Chemical Society*, 129(46), 14176–14177. <https://doi.org/10.1021/ja076877g>
- [13] Ubaidullah, M., Al-Enizi, A. M., Ahamad, T., Shaikh, S. F., Al-Abdrabalnabi, M. A., Samdani, M. S., Kumar, D., Alam, M. A., & Khan, M. (2021). Fabrication of highly porous N-doped mesoporous carbon using waste polyethylene terephthalate bottle-based MOF-5 for high performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102125>
- [14] Ubaidullah, M., Al-Enizi, A. M., Shaikh, S., Ghanem, M. A., & Mane, R. S. (2020). Waste PET plastic derived ZnO@NMC nanocomposite via MOF-5 construction for hydrogen and oxygen evolution reactions. *Journal of King Saud University - Science*, 32(4), 2397–2405. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.025>
- [15] Jalali, M., Atighi, M., Hasanzadeh, M., & Bidoki, S. M. (2023). Synthesis of MOF-5 Particles and PVDF/MOF Nanofibers Production. <https://www.researchgate.net/publication/370779123>
- [16] Anim, A., Mahmoud, L. A. M., Kelly, A. L., Katsikogianni, M. G., & Nayak, S. (2023). Biodegradable Polymer Composites of Metal Organic Framework-5 (MOF-5) for the Efficient and Sustained Delivery of Cephalexin and Metronidazole. *Applied Sciences*, 13(19), 10611. <https://doi.org/10.3390/app131910611>
- [17] Ata-ur-Rehman, Tirmizi, S. A., Badshah, A., Ammad, H. M., Jawad, M., Abbas, S. M., Rana, U. A., & Khan, S. U. D. (2018). Synthesis of highly stable MOF-5@MWCNTs nanocomposite with improved hydrophobic properties. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(1), 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.01.012>
- [18] Peedikakkal, A. M. P., & Aljund, I. H. (2021). Upgrading the hydrogen storage of mof-5 by post-synthetic exchange with divalent metal ions. *Applied Sciences*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/app112411687>

- [19] Cai, M., Qin, L., You, L., Yao, Y., Wu, H., Zhang, Z., Zhang, L., Yin, X., & Ni, J. (2020). Functionalization of MOF-5 with mono-substituents: Effects on drug delivery behavior. *RSC Advances*, 10(60), 36862–36872. <https://doi.org/10.1039/d0ra06106a>
- [20] Chen, G., Luo, J., Cai, M., Qin, L., Wang, Y., Gao, L., Huang, P., Yu, Y., Ding, Y., Dong, X., Yin, X., & Ni, J. (2019). Investigation of metal-organic framework-5 (MOF-5) as an antitumor drug oridonin sustained release carrier. *Molecules*, 24(18). <https://doi.org/10.3390/molecules24183369>
- [21] Rahayu, P., & Lestari, W. W. (2016). Study Of Synthesis And Characterization Of Metal-Organic Frameworks Mof-5 As Hydrogen Storage Material. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 12(1), 14. <https://doi.org/10.20961/alchemy.v12i1.934>
- [22] Zhi Xiang Hong, T., Trung Kieu, H., You, L., Zheng, H., Wing-Keung Law, A., & Zhou, K. (2022). 2D CuBDC and IRMOF-1 as reverse osmosis membranes for seawater desalination: A molecular dynamics study. *Applied Surface Science*, 601. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154088>
- [23] Ypp, K., Fattah, A., Lamongan, S. S., Sholichah, N., Basith, A., & Priyasmika, R. (2022). Pengaruh Penambahan Nikel (Ni) Terhadap Sifat Struktur Kristal Dan Morfologi MOF-5. *Jurnal Matematika & Sains*. 2(2).
- [24] Sabouni, R., Kazemian, H., & Rohani, S. (2010). A novel combined manufacturing technique for rapid production of IRMOF-1 using ultrasound and microwave energies. *Chemical Engineering Journal*, 165(3), 966–973. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.036>
- [25] Tri, A., Mulyati, R. E., & Rosyidah, A. (2015b). Influence of solvothermal temperatures and times on crystallinity and morphology of MOF-5. *Indonesian Journal Chem* 15(2).
- [26] Wang, S., Xie, X., Xia, W., Cui, J., Zhang, S., & Du, X. (2020). Study on the structure activity relationship of the crystal MOF-5 synthesis, thermal stability and N₂ adsorption property. *High Temperature Materials and Processes*, 39(2020), 171–177. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0034>
- [27] Lu, C. M., Liu, J., Xiao, K., & Harris, A. T. (2010). Microwave enhanced synthesis of MOF-5 and its CO₂ capture ability at moderate temperatures across multiple capture and release cycles. *Chemical Engineering Journal*, 156(2), 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.067>
- [28] Saha, D., Wei, Z., & Deng, S. (2009). Hydrogen adsorption equilibrium and kinetics in metal-organic framework (MOF-5) synthesized with DEF approach. *Separation and Purification Technology*, 64(3), 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.10.022>
- [29] Zhao, Z., Li, Z., & Lin, Y. S. (2009). Adsorption and diffusion of carbon dioxide on metal-organic framework (MOF-5). *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(22), 10015–10020. <https://doi.org/10.1021/ie900665f>
- [30] Ming, Y., Purewal, J., Liu, D., Sudik, A., Xu, C., Yang, J., Veenstra, M., Rhodes, K., Soltis, R., Warner, J., Gaab, M., Müller, U., & Siegel, D. J. (2014). Thermophysical properties of MOF-5 powders. *Microporous and Mesoporous Materials*, 185, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.11.015>
- [31] Peng, M. M., Jeon, U. J., Ganesh, M., Aziz, A., Vinodh, R., Palanichamy, M., & Jang, H. T. (2014). Oxidation of ethylbenzene using nickel oxide supported metal organic framework catalyst. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 35(11), 3213–3218. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2014.35.11.3213>
- [32] Song, P., Kang, L., Wang, H., Guo, R., & Wang, R. (2019). Nitrogen (N), Phosphorus (P)-Codoped Porous Carbon as a Metal-Free Electrocatalyst for N₂ Reduction under Ambient Conditions. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(13), 12408–12414. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b20472>
- [33] Xiang, B. lin, Fu, L., Li, Y., & Liu, Y. (2019). A New Fe(III)/MOF-5(Ni) Catalyst for Highly Selective Synthesis of Catechol from Phenol and Hydrogen Peroxide. *Chemistry Select*, 4(4), 1502–1509. <https://doi.org/10.1002/slct.201803445>
- [34] Katoch, A., Bhardwaj, R., Goyal, N., & Gautam, S. (2018). Synthesis, structural and optical study of Ni-doped Metal-organic framework for adsorption based chemical sensor application. *Vacuum*, 158, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.09.019>
- [35] Kumar, P., Paul, A. K., & Deep, A. (2014). Sensitive chemosensing of nitro group containing organophosphate pesticides with MOF-5. *Microporous and Mesoporous Materials*, 195, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.04.017>
- [36] Xia, C., Yu, C., Cao, M., Xia, J., Jiang, D., Zhou, G., Zhang, D., & Li, H. (2018). A Eu and Tb co-doped MOF-5 compound for ratiometric high temperature sensing. *Ceramics International*, 44(17), 21040–21046. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.140>