



Review: Modifikasi *Metal-Organic Frameworks* sebagai Katalis Epoksidasi Olefin

Laela Mukaromah*, Universitas Sriwijaya, Indonesia
Neza Rahayu Palapa, Universitas Sriwijaya, Indonesia
Bijak Riyandi Ahadito, Universitas Sriwijaya, Indonesia

ABSTRACT

The development of heterogeneous catalysts has become a prominent aspect in enhancing the catalytic performance for numerous chemical reactions. As porous inorganic materials, metal-organic frameworks emerge as a support material for resolving the separation problem of homogeneous catalysts like high-valent molybdenum complexes that have been widely used for olefin epoxidation. The method used in this review article is a narrative literature review with a simplified approach. The result of this article review points out that the modification of metal-organic frameworks with molybdenum complexes can be conducted through one-pot synthesis or post-synthetic methods. Zirconium and copper-based metal-organic frameworks are mainly chosen for their outstanding properties as solid support materials for molybdenum complexes. Both modification methods generate a catalyst with high selectivity and conversion for olefin epoxidation, such as *cis*-cyclooctene.

ARTICLE HISTORY

Submitted 25/11/2025
Revised 08/12/2025
Accepted 13/12/2025

KEYWORDS

Modification; metal-organic frameworks; catalyst; epoxidation; olefin.

CORRESPONDENCE AUTHOR

✉ mukaromah@unsri.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.30743/cheds.v7i1.12412>

1. PENDAHULUAN

Epoksidasi merupakan salah satu reaksi penting dalam sintesis kimia organik, khususnya epoksidasi senyawa olefin (Zhang et al., 2021). Reaksi epoksidasi olefin menghasilkan produk epoksida berupa cincin eter siklik yang bersifat sangat reaktif (Moghadashkou et al., 2023). Epoksida olefin berperan sebagai prekursor maupun spesi intermediat dalam berbagai bidang industri kimia seperti industri farmasi, agrokimia, kosmetik, produksi surfaktan, resin epoksi, parfum, detergen, cat dan plastik (Gao et al., 2025; Ghasemiyan et al., 2024). Kegunaan epoksida olefin yang luas berkaitan dengan permintaan industri kimia yang terus meningkat setiap tahunnya (Deng et al., 2024). Oleh karena itu, reaksi epoksidasi olefin membutuhkan katalis untuk meningkatkan selektivitas reaksi, efisiensi produk, menurunkan temperatur reaksi, dan mengurangi produk samping (Moghadashkou et al., 2023).

Katalis yang tepat memiliki peran penting pada reaksi epoksidasi olefin, sehingga perkembangan katalis pada reaksi epoksidasi olefin menjadi perhatian tersendiri. Katalis yang berasal dari senyawa kompleks logam transisi seperti rhenium, titanium, vanadium, mangan, dan molibdenum telah digunakan pada reaksi epoksidasi olefin (Mirzaee et al., 2017). Katalis berbasis senyawa kompleks ini merupakan jenis katalis homogen. Katalis homogen berbasis molibdenum diketahui memiliki aktivitas katalitik dan selektivitas yang tinggi, terutama senyawa kompleks molibdenum bervalensi tinggi yaitu Mo(VI) atau oksomolibdenum. Senyawa kompleks oksomolibdenum dapat melakukan oksidasi katalitik berupa transfer atom oksigen pada senyawa olefin untuk membentuk epoksidanya (Bravo-Sanabria et al., 2023). Senyawa kompleks oksomolibdenum memiliki rumus umum kimia MoO_2L dengan ligan mono, bi, tri, atau tetradentat yang bermuatan netral atau anionik (Pandhare et al., 2014). Di sisi lain, senyawa kompleks oksomolibdenum ini juga diketahui memiliki aktivitas katalitik tinggi pada temperatur rendah. Akan tetapi, katalis homogen berbasis oksomolibdenum juga memiliki kekurangan yaitu proses pemisahan yang rumit antara katalis dan produk pada akhir reaksi (Neves et al., 2015). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, senyawa kompleks oksomolibdenum perlu dikombinasikan dengan material padat sebagai penyangga, salah satunya *metal-organic frameworks*.

Metal-organic frameworks (MOFs) merupakan material anorganik berpori yang saat ini telah banyak dikembangkan. MOFs tersusun atas kluster ion logam yang terkoordinasi dengan ligan organik sebagai *linker* atau penghubung (Haryanto et al., 2021). Selain dikenal karena kristalinitasnya yang tinggi, MOFs juga diketahui memiliki porositas, luas permukaan, fleksibilitas ukuran pori, bentuk dan struktur, serta stabilitas termal yang tinggi (Mukaromah et al., 2022). Karakteristik tersebut melatarbelakangi penggunaan MOFs secara luas dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai katalis untuk reaksi epoksidasi. Berdasarkan temuan sebelumnya, MOFs dapat digunakan secara langsung sebagai katalis heterogen pada reaksi epoksidasi (Otake et al., 2021) maupun dijadikan material penyangga untuk katalis

homogen seperti senyawa kompleks oksomolibdenum (Afzali et al., 2019). Modifikasi MOFs dengan senyawa kompleks oksomolibdenum memanfaatkan keunggulan MOFs sebagai material penyangga untuk senyawa kompleks oksomolibdenum yang memiliki performa katalitik tinggi, namun terkendala pemisahan jika digunakan langsung. *Review* ini difokuskan pada reaksi epoksidasi olefin menggunakan katalis heterogen MOFs yang dimodifikasi dengan senyawa kompleks oksomolibdenum. *Review* ini bertujuan untuk mengkaji sintesis dan performa katalitik MOFs termodifikasi senyawa kompleks oksomolibdenum. Performa katalitik meliputi aktivitas, selektivitas, dan stabilitas katalis dalam memproduksi epoksida olefin juga akan dijelaskan. MOFs termodifikasi senyawa kompleks oksomolibdenum yang dapat mempertahankan performa katalitik seperti senyawa kompleks oksomolibdenum pada reaksi epoksidasi olefin menjadi kebaruan *review* ini. Selanjutnya, pada bagian akhir akan disampaikan ringkasan dan masukan untuk pengembangan di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan pada penulisan artikel *review* ini menggunakan pendekatan kualitatif *narrative literature review*. Pendekatan ini menitikberatkan pada proses mencari dan merangkum materi yang relevan dan telah dipublikasi sebelumnya sesuai dengan topik yang telah ditentukan. *Narrative literature review* dipilih karena memungkinkan penulis untuk mendiskusikan suatu topik yang dipilih dan menyediakan informasi terkini melalui proses penulisan yang lebih fleksibel dan cepat (Alvaro & Zwicky, 2021).

2.2 Target/Subjek Penelitian

Artikel dari beberapa *database* seperti *Google Scholar* dan *ScienceDirect* yang relevan dengan kata kunci “modifikasi *metal-organic frameworks* dengan senyawa kompleks oksomolibdenum” serta “katalis epoksidasi olefin” dan dipilih sejumlah 22 artikel yang relevan dengan topik artikel *review* ini.

2.3 Prosedur

Terdapat beberapa tahapan penulisan artikel *review* ini, yaitu: 1) menentukan tujuan dan topik yang akan dikaji yaitu modifikasi *metal-organic frameworks* dengan senyawa kompleks oksomolibdenum untuk reaksi epoksidasi olefin 2) mencari artikel sesuai topik yang telah ditentukan pada rentang 10 tahun terakhir, 3) menganalisa informasi dari artikel yang diperoleh, 4) merangkum dan menuliskan informasi yang telah dianalisa (Snyder, 2019).

2.4 Data, Instrumen, dan Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penulisan artikel *review* ini diperoleh dari beberapa *database* seperti *Google Scholar* dan *ScienceDirect* dengan kata kunci “modifikasi *metal-organic frameworks* dengan senyawa kompleks oksomolibdenum” serta “katalis epoksidasi olefin” dan dipilih sejumlah 22 artikel yang relevan dengan topik artikel *review* ini.

2.5 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan pada penulisan artikel *review* ini menggunakan *simplified approach* yaitu dengan menganalisa dan merangkum informasi dari setiap artikel relevan yang diperoleh untuk kemudian digabungkan hasil penelitiannya dalam bentuk tinjauan literatur (Wati et al., 2024). Tahapan analisis data meliputi pengumpulan, pengelompokan, dan penyusunan data sesuai dengan sub topik yang telah ditentukan di awal penulisan artikel *review* ini. Data dari artikel yang relevan tersebut kemudian diintegrasikan dalam bentuk narasi *review* sehingga dapat ditarik kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Modifikasi MOFs sebagai Katalis Epoksidasi Olefin

Reaksi fungsionalisasi ikatan karbon rangkap dua ($C=C$) pada senyawa olefin atau alkena merupakan salah satu reaksi penting dalam kimia organik yang dapat menghasilkan berbagai senyawa turunan. Epoksidasi olefin termasuk dalam jenis reaksi fungsionalisasi yang bertujuan untuk mengubah senyawa olefin menjadi epoksida dengan tambahan oksidator seperti hidrogen peroksida dan tersier-butil hidropersoksida (TBHP) (Saha et al., 2018). Epoksida berperan sebagai spesi intermediat aktif yang dapat meningkatkan nilai tambah berbagai produk di industri kimia. Secara umum, epoksidasi olefin menggunakan katalisis berbasis senyawa kompleks logam transisi dan sudah berlangsung selama beberapa dekade. Senyawa kompleks berbasis molibdenum bervalensi tinggi dengan berbagai jenis ligan dikenal sebagai katalis aktif pada epoksidasi olefin yang ditunjukkan dengan aktivitas katalitik yang tinggi seperti pada senyawa siklootena dan sikloheksena (Judmaier et al., 2012). Di sisi lain, senyawa kompleks molibdenum ini dikenal memiliki harga yang tinggi dan sulit dipisahkan dari produk pada akhir reaksi karena termasuk jenis katalis homogen (Neves et

al., 2015). Kedua hal tersebut akan menjadi tantangan tersendiri jika digunakan pada skala industri dalam jangka waktu yang lama. Maka, untuk mengatasi permasalahan katalis homogen ini, dikembangkan proses penggabungan senyawa kompleks molibdenum dengan material padatan yang dapat berperan sebagai penyangga seperti *metal-organic frameworks* agar menjadi katalis heterogen.

Metal-organic frameworks (MOFs) dapat diaplikasikan sebagai katalis heterogen, selain sebagai material penyangga untuk katalis homogen (Agusta et al., 2022). MOFs menjadi solusi untuk pemisahan produk, sekaligus mampu mempertahankan aktivitas katalitik dari katalis homogen yang digabungkan (Tang et al., 2014). Beberapa tipe MOFs yang digunakan secara langsung sebagai katalis epoksidasi olefin antara lain ZnCo-MOF (Zhang et al., 2021), Cu-MOF (C. Chen et al., 2016), MOF-5 (Stubbs et al., 2018), MgCu-MOF (Saha et al., 2018), dan MIL-53(Al) (Kravchenko et al., 2018). Sementara tipe MOFs yang digunakan sebagai material penyangga untuk senyawa kompleks molibdenum antara lain MIL-100(Cr) (Rostamnia & Mohsenzad, 2018), NU-1000 (Noh et al., 2016), NU-1200 (Y. Chen et al., 2021), UiO-66-NH₂ (Tang et al., 2014), UiO-67 (Neves et al., 2015), MIL-125-NH₂ (Bravo-Sanabria et al., 2023), dan HKUST-1 (Abednatanzi et al., 2015). Modifikasi MOFs dengan senyawa kompleks molibdenum dapat dilakukan melalui metode sintesis langsung (*one-pot synthesis*) maupun pascasintesis (*post-synthetic*).

Neves et al. memodifikasi MOFs tipe UiO-67 berbasis zirkonium(IV) dengan senyawa kompleks molibdenum MoO₂Cl₂ melalui metode sintesis langsung. MOFs tipe UiO-67 memiliki unit bangun sekunder [Zr₆O₄(OH)₄]¹²⁺ dengan 12 koordinasi pada ligan 4,4'-bifenildikarboksilat (BPDC) (Hester et al., 2016). Senyawa kompleks MoO₂Cl₂ direaksikan dengan ligan 5,5'-bipiridindikarboksilat (BPyDC) terlebih dahulu untuk menghasilkan [MoO₂Cl₂(BPyDC)]. Selanjutnya, ZrCl₄, H₂BPDC, dan [MoO₂Cl₂(H₂BPyDC)] dilarutkan dalam DMF pada temperatur 100°C selama 3 hari untuk menghasilkan UiO-67-MoO₂Cl₂(BPyDC). UiO-67 berhasil dimodifikasi dengan [MoO₂Cl₂(H₂BPyDC)] melalui proses penggantian parsial ligan BPDC oleh kompleks molibdenum. UiO-67-MoO₂Cl₂(BPyDC) menunjukkan struktur kristal yang serupa dengan kerangka dasar UiO-67. Material ini kemudian diaplikasikan sebagai katalis epoksidasi *cis*-siklooktena dan limonena dengan oksidator TBHP (Neves et al., 2015).

Metode pascasintesis untuk memodifikasi MOFs tipe HKUST-1 atau CuBTC berbasis tembaga(II) dengan senyawa kompleks molibdenum MoO₂(acac)₂ dilaporkan oleh Abednatanzi et al. MOFs tipe CuBTC memiliki unit bangun sekunder yang tersusun atas dua ion Cu²⁺ yang terikat dengan empat ligan 1,3,5-benzentrikarboksilat (BTC) dan membentuk sistem pori tiga dimensi (Kim et al., 2015). CuBTC disintesis dari campuran Cu(NO₃)₂·3H₂O yang dilarutkan dalam air dan H₃BTC yang dilarutkan dalam etanol, lalu dipanaskan pada temperatur 120°C selama 12 jam. CuBTC direaksikan dengan 4-aminopiridin (AMP) sebagai ligan penghubung terlebih dahulu untuk menghasilkan AMP-CuBTC. Selanjutnya, AMP-CuBTC direaksikan dengan MoO₂(acac)₂ dalam DCM pada temperatur 100°C selama 3 jam untuk menghasilkan Mo-AMP-CuBTC. Katalis ini kemudian digunakan untuk epoksidasi beberapa senyawa olefin seperti siklooktena, sikloheksena, stirena, dan norbornena dengan oksidator TBHP (Abednatanzi et al., 2015).

3.2 Performa Katalitik pada Epoksidasi Olefin

Performa katalitik epoksidasi olefin secara singkat dapat diamati dari dua aspek utama yaitu persentase konversi dan selektivitas produk senyawa epoksi yang dihasilkan. Neves et al. berhasil memodifikasi MOFs tipe UiO-67 dengan senyawa kompleks [MoO₂Cl₂(BPyDC)] yang digunakan untuk epoksidasi *cis*-siklooktena dan limonena dengan oksidator TBHP pada temperatur 75°C. Senyawa 1,2-epoksisiklooktena merupakan produk utama epoksidasi *cis*-siklooktena dengan konversi sebesar 63% dan 97% dengan selektivitas sebesar 100% setelah reaksi selama 6 jam dan 24 jam, secara berurutan, menggunakan katalis UiO-67-MoO₂Cl₂(BPyDC). Sedangkan konversi epoksidasi *cis*-siklooktena jika menggunakan katalis UiO-67 tanpa molibdenum hanya sebesar 18% setelah reaksi selama 24 jam. Selanjutnya, potensi katalis UiO-67-MoO₂Cl₂(BPyDC) juga dikaji untuk epoksidasi limonena yang menghasilkan 1,2-epoksilimonena dengan selektivitas 100% pada konversi 67%. Hasil ini menunjukkan bahwa performa katalitik MOFs meningkat signifikan setelah dimodifikasi dengan senyawa kompleks molibdenum (Neves et al., 2015).

Tang et al. melaporkan performa katalitik MOFs berbasis zirkonium(IV) tipe UiO-66-NH₂ yang termodifikasi senyawa kompleks MoO₂(acac)₂ (MoA) dan MoO(O₂)₂·2DMF (MoD) untuk epoksidasi *cis*-siklooktena. UiO-66-NH₂ dan MoO₂(acac)₂ dihubungkan oleh salisilaldehida (sal), piridin-2-aldehida (PI), dan 2-kloropiridin (PC) membentuk enam jenis katalis. Epoksidasi *cis*-siklooktena dengan oksidator TBHP berlangsung pada temperatur 80°C selama 24 jam. Konversi dan selektivitas epoksidasi *cis*-siklooktena sebesar 99% dihasilkan ketika menggunakan katalis UiO-66-sal-MoA dan UiO-66-sal-MoD. Katalis UiO-66-sal-Mo menunjukkan aktivitas katalitik lebih baik dibandingkan UiO-66-PI-Mo dan UiO-66-PC-Mo. Hal ini dikarenakan okupansi pori MOFs oleh salisilaldehida lebih sedikit, sehingga jumlah muatan molibdenum lebih tinggi. Selanjutnya, karakterisasi FT-IR menjelaskan bahwa gugus khelasi pada UiO-66-sal membentuk koordinasi yang kuat dengan molibdenum. Analisis ICP mengkonfirmasi sebanyak 15,2% molibdenum termuat dalam UiO-66-sal. Di samping itu, stabilitas katalis MOFs termodifikasi kompleks molibdenum juga dievaluasi melalui siklus reaksi berulang. Hasil uji stabilitas menunjukkan bahwa katalis tetap aktif selama lima kali pengulangan reaksi dengan konversi epoksidasi sebesar 99%. MOFs tipe UiO-66-NH₂ tidak hanya berperan sebagai

material penyangga untuk MoA dan MoD, tetapi juga meningkatkan kontak antara *cis*-siklooktena dan sisi aktif senyawa kompleks molibdenum (Tang et al., 2014).

Performa katalitik MOFs berbasis tembaga(II) tipe HKUST-1 atau CuBTC termodifikasi senyawa kompleks $\text{MoO}_2(\text{acac})_2$ untuk epoksidasi olefin telah dikaji oleh Abednatanzi et al. CuBTC dan $\text{MoO}_2(\text{acac})_2$ dihubungkan oleh senyawa aminopiridin (AMP) membentuk katalis Mo-AMP-CuBTC menggunakan metode pascasintesis. Epoksidasi siklooktena, sikloheksena, stirena, dan norbornena dengan oksidator TBHP dan katalis Mo-AMP-CuBTC berlangsung pada temperatur 60°C selama 24 jam dengan selektivitas >99% untuk keempat olefin tersebut. Konversi siklooktena, sikloheksena, stirena, dan norbornena yaitu 99%, 90%, 99%, dan 93% berturut-turut. Sedangkan konversi epoksidasi siklooktena jika menggunakan katalis CuBTC tanpa molibdenum hanya mencapai 46% dan selektivitas 50% setelah reaksi selama 6 jam. Selanjutnya, katalis Mo-AMP-CuBTC juga diamati stabilitasnya untuk digunakan kembali pada reaksi epoksidasi. Katalis Mo-AMP-CuBTC menunjukkan kestabilan konversi selama lima kali pengulangan reaksi epoksidasi yaitu >90% tanpa kehilangan kristalinitasnya. Hasil ini menunjukkan bahwa MOFs tipe CuBTC termasuk material penyangga yang tepat untuk $\text{MoO}_2(\text{acac})_2$ dengan efisiensi yang tinggi pada reaksi epoksidasi olefin (Abednatanzi et al., 2015).

Beberapa MOFs telah berhasil dimodifikasi dengan senyawa kompleks molibdenum, baik melalui metode sintesis langsung maupun pascasintesis. Metode sintesis langsung pada modifikasi UiO-67 tidak memerlukan ligan penghubung tambahan, tetapi senyawa kompleks molibdenum yang digunakan memiliki ligan BPyDC yang dapat mengganti sebagian ligan BPDC pada struktur kerangka MOFs (Tang et al., 2014). Sementara metode pascasintesis pada modifikasi UiO-66-NH₂ dan HKUST-1 membutuhkan ligan penghubung untuk senyawa kompleks molibdenum (Abednatanzi et al., 2015; Neves et al., 2015). Metode sintesis langsung menawarkan waktu sintesis yang lebih cepat, tetapi stabilitas katalis lebih rendah dibandingkan metode pascasintesis. Di sisi lain, stabilitas katalis menjadi pertimbangan penting pada suatu reaksi, yang mana dalam hal ini menjadi keunggulan metode pascasintesis. Optimasi keterbatasan dari kedua metode sintesis katalis tersebut menjadi tantangan tersendiri, terutama jika katalis akan digunakan pada skala industri. Kemudian, kajian terkait penurunan stabilitas MOFs pada kondisi oksidatif dan pengaruh persentase molibdenum yang termuat dalam kerangka terhadap porositas MOFs juga perlu diamati agar penggunaan katalis MOFs termodifikasi senyawa molibdenum untuk epoksidasi olefin akan lebih efisien.

4. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Modifikasi MOFs berbasis logam transisi seperti zirkonium(IV) dan tembaga(II) dengan senyawa kompleks molibdenum bervalensi tinggi Mo(VI) untuk reaksi epoksidasi olefin dapat menjadi solusi dari permasalahan pemisahan senyawa kompleks molibdenum sebagai katalis homogen yang rumit, sekaligus meningkatkan performa katalitik MOFs sebagai katalis heterogen. Modifikasi MOFs dengan senyawa kompleks molibdenum dapat dilakukan melalui metode langsung maupun pascasintesis. MOFs termodifikasi senyawa kompleks molibdenum terbukti memiliki performa katalitik yang unggul dan stabil pada reaksi berulang. Performa katalitik dan stabilitas katalis merupakan dua aspek penting yang menjadi dasar pengembangan MOFs termodifikasi senyawa kompleks molibdenum untuk reaksi epoksidasi senyawa olefin. Keberhasilan dalam mengkombinasikan katalis homogen dan heterogen ini membuka peluang untuk aplikasi yang lebih luas kedepannya.

4.2 Saran

Penelitian terkait peningkatan stabilitas MOFs termodifikasi senyawa kompleks molibdenum perlu dikaji lebih lanjut, baik yang disintesis melalui metode langsung maupun pascasintesis, terutama untuk MOFs berbasis logam yang lebih terjangkau dari sisi ekonomi. Selain itu, stabilitas jangka panjang dan regenerasi MOFs termodifikasi senyawa kompleks molibdenum juga penting untuk dipelajari dengan variasi olefin dan diuji pada kondisi reaksi nyata.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abednatanzi, S., Abbasi, A., & Masteri-Farahani, M. (2015). Post-synthetic modification of nanoporous $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ metal-organic framework via immobilization of a molybdenum complex for selective epoxidation. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 399, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.01.014>
- Afzali, N., Kardanpour, R., Zadehahmadi, F., Tangestaninejad, S., Moghadam, M., Mirkhani, V., Mechler, A., Mohammadpoor-Baltork, I., & Bahadori, M. (2019). Molybdenum(VI)-functionalized UiO-66 provides an efficient heterogeneous nanocatalyst in oxidation reactions. *Applied Organometallic Chemistry*, 33(11), 5225. <https://doi.org/10.1002/aoc.5225>
- Agusta, K. D., Miharja, M. F., Sakti, A. W., Arrozi, U. S. F., Mukaromah, L., Patah, A., Hara, T., & Permana, Y. (2022). Zr-MOFs – catalyzed transfer hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol: Unveiled performance of DUT-52.

- Molecular Catalysis*, 524, 112265. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2022.112265>
- Alvaro, E., & Zwicky, D. A. (2021). Improving the quality of literature reviews in chemistry: Tools and techniques. *ACS Chemical Health & Safety*, 28(5), 303–310. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00046>
- Bravo-Sanabria, C. A., Solano-Delgado, L. C., Valdivieso-Zarate, L. M., Ospina-Ospina, R., Martínez-Ortega, F., & Ramírez-Caballero, G. E. (2023). Photo-epoxidation of α -pinene catalyzed by a Mo^{VI} oxo-diperoxo complex modified Ti-based metal-organic framework. *Molecular Catalysis*, 545, 113240. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113240>
- Chen, C., Shen, P., Wan, M., Ding, N., Shi, X., Wang, X., & Zhang, N. (2016). Size-selective epoxidation of olefins in two new metal-organic framework constructed from six-coordinated tetranuclear Cu(II) SBUs. *Microporous and Mesoporous Materials*, 232, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.06.013>
- Chen, Y., Zhang, X., Wang, X., Drout, R. J., Mian, M. R., Cao, R., Ma, K., Xia, Q., Li, Z., & Farha, O. K. (2021). Insights into the structure-activity relationship in aerobic alcohol oxidation over a metal-organic-framework-supported molybdenum(VI) catalyst. *Journal of the American Chemical Society*, 143(11), 4302–4310. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c12963>
- Deng, X., et al. (2024). Regulating the coordination mode of Ti atoms in the beta zeolite framework to enhance the 1-hexene epoxidation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 63(9), 3817–3826. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03543>
- Gao, T., Sun, W., Wang, H., Zhang, J., Yan, Z., Trentesaux, M., Marinova, M., Wang, C., Ordonsky, V., & Paul, S. (2025). Synthesis of a heterogeneous 2D COF-based Fenton catalyst for epoxidation of olefins. *Journal of Catalysis*, 449, 116217. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2025.116217>
- Ghasemiyan, M., Abbasi, A., & Hosseini, M. S. (2024). Facile encapsulation of a cobalt complex inside the micropores of ZIF-8 through the bottle around the ship method: A novel heterogeneous catalyst for epoxidation of alkenes. *Journal of Molecular Structure*, 1311, 138413. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138413>
- Haryanto, A., Mukaromah, L., Permana, Y., & Patah, A. (2021). Photocatalytic activity of CuBDC and UiO-66 MOFs for methyl orange degradation. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 53, 791–795.
- Hester, P., Xu, S., Liang, W., Al-Janabi, N., Vakili, R., Hill, P., Muryn, C. A., Chen, X., Martin, P. A., & Fan, X. (2016). On thermal stability and catalytic reactivity of Zr-based metal-organic framework (UiO-67) encapsulated Pt catalysts. *Journal of Catalysis*, 340, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2016.05.003>
- Judmaier, M. E., Holzer, C., Volpe, M., & Mösch-Zanetti, N. C. (2012). Molybdenum(VI) dioxo complexes employing Schiff base ligands with an intramolecular donor for highly selective olefin epoxidation. *Inorganic Chemistry*, 51(18), 9956–9966. <https://doi.org/10.1021/ic301464w>
- Kim, H. K., Yun, W. S., Kim, M. B., Kim, J. Y., Bae, Y. S., Lee, J. D., & Jeong, N. C. (2015). A chemical route to activation of open metal sites in the copper-based metal-organic framework materials HKUST-1 and Cu-MOF-2. *Journal of the American Chemical Society*, 137(31), 10009–10015. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b06637>
- Kravchenko, D. E., Tyablikov, I. A., Kots, P. A., Kolozhvari, B. A., Fedosov, D. A., & Ivanova, I. I. (2018). Olefin epoxidation over metal-organic frameworks modified with transition metals. *Petroleum Chemistry*, 58(14), 1255–1262. <https://doi.org/10.1134/S0965544118140062>
- Mirzaee, M., Bahramian, B., Gholizadeh, J., Feizi, A., & Gholami, R. (2017). Acetylacetonate complexes of vanadium and molybdenum supported on functionalized boehmite nano-particles for the catalytic epoxidation of alkenes. *Chemical Engineering Journal*, 308, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.055>
- Moghadaskhou, F., Hosseini, A. K., Tadjarodi, A., & Abroudi, M. (2023). Amino-induced cadmium metal-organic framework based on thiazole ligand as a heterogeneous catalyst for the epoxidation of alkenes. *Scientific Reports*, 13, 15391. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42666-1>
- Mukaromah, L., Permana, Y., & Patah, A. (2022). Influence of room-temperature ionic liquids on the electrosynthesis of CuBDC type metal-organic frameworks: Crystallite size and productivity. *Journal of Research and Development on Nanotechnology*, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.5614/jrdn.2022.2.1.17142>
- Neves, P., Gomes, A. C., Amarante, T. R., Paz, F. A. A., Pillinger, M., Gonçalves, I. S., & Valente, A. A. (2015). Incorporation of a dioxomolybdenum(VI) complex in a Zr^{IV}-based metal-organic framework and its application in catalytic olefin epoxidation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 202, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.09.046>
- Noh, H., Cui, Y., Peters, A. W., Pahls, D. R., Ortuño, M. A., Vermeulen, N. A., Cramer, C. J., Gagliardi, L., Hupp, J. T., & Farha, O. K. (2016). An exceptionally stable metal-organic framework supported molybdenum(VI) oxide catalyst for cyclohexene epoxidation. *Journal of the American Chemical Society*, 138(44), 14720–14726. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b08898>
- Otake, K., Ahn, S., Knapp, J., Hupp, J. T., Notestein, J. M., & Farha, O. K. (2021). Vapor-phase cyclohexene epoxidation by single-ion Fe(III) sites in metal-organic frameworks. *Inorganic Chemistry*, 60, 2457–2463. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c03364>
- Pandhare, S. L., Jadhao, R. R., Puranik, V. G., Joshi, P. V., Capet, F., Dongare, M. K., Umbarkar, S. B., Michon, C., &

- Agbossou-Niedercorn, F. (2014). Molybdenum(VI) dioxo complexes for the epoxidation of allylic alcohols and olefins. *Journal of Organometallic Chemistry*, 772-773, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2014.09.029>
- Rostamnia, S., & Mohsenzad, F. (2018). Nanoarchitecturing of open metal site Cr-MOFs for oxodiperoxo molybdenum complexes [MoO(O₂)₂@En/MIL-100(Cr)] as promising and bifunctional catalyst for selective thioether oxidation. *Molecular Catalysis*, 445, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2017.11.003>
- Saha, D., Gayen, S., & Koner, S. (2018). Cu(II)/Cu(II)-Mg(II) containing pyridine-2,5-dicarboxylate frameworks: Synthesis, structural diversity, inter-conversion and heterogeneous catalytic epoxidation. *Polyhedron*, 146, 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2018.02.023>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Stubbs, A. W., Braglia, L., Borfecchia, E., Meyer, R. J., Román-Leshkov, Y., Lamberti, C., & Dincă, M. (2018). Selective catalytic olefin epoxidation with Mn^{II}-exchanged MOF-5. *ACS Catalysis*, 8(1), 596-601. <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b02946>
- Tang, J., Dong, W., Wang, G., Yao, Y., Cai, L., Liu, Y., Zhao, X., Xu, J., & Tan, L. (2014). Efficient molybdenum(VI) modified Zr-MOF catalysts for epoxidation of olefins. *RSC Advances*, 4(81), 42977-42982. <https://doi.org/10.1039/c4ra07133f>
- Wati, D. S., Nursilawati, N., & Purwita, R. (2024). Literature review : Pengembangan potensi limbah kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan dengan proses hidrolisis guna menyongsong Indonesia emas 2045. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science*, 8(2), 197-202. <https://doi.org/10.30743/cheds.v7i1.10053>
- Zhang, H., Lu, X., Yang, L., Hu, Y., Yuan, M., Wang, C., Liu, Q., Yue, F., Zhou, D., & Xia, Q. (2021). Efficient air epoxidation of cycloalkenes over bimetal-organic framework ZnCo-MOF materials. *Molecular Catalysis*, 499, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2020.111300>