

BUNGA RAMPAI TEROBOSAN TERKINI DALAM KIMIA:

**INOVASI MATERIAL, ENERGI, DAN KESEHATAN UNTUK MASA DEPAN
BERKELANJUTAN**



Penulis:

1. Aisyah
2. Ummi Zahra
3. Arfiani Nur
4. Rina Setyawati

BUNGA RAMPAI TEROBOSAN TERKINI DALAM KIMIA: INOVASI MATERIAL, ENERGI, DAN KESEHATAN UNTUK MASA DEPAN BERKELANJUTAN

Aisyah; Umami Zahra; Arfiani Nur; Rina Setyawati

Editor: Jumriah Nur



PT. Mustika Sri Rosadi

BUNGA RAMPAI TEROBOSAN TERKINI DALAM KIMIA: INOVASI MATERIAL, ENERGI, DAN KESEHATAN UNTUK MASA DEPAN BERKELANJUTAN

Penulis:

Aisyah; Umami Zahra; Arfiani Nur; Rina Setyawati

Editor: Jumriah Nur

Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

Desain Sampul: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

ISBN: 978-634-7775-35-1 (PDF)

Cetakan Pertama: 03 Juli 2026

Hak Cipta 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh **Penerbit Mustika Sri Rosadi**

Anggota IKAPI No. 544/JBA/2026

Alamat:

Citra Indah City, Bukit Heliconia, Kec. Jonggol, Kab. Bogor.

Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com

Website: mustikamars.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku bunga rampai yang berjudul **“Terobosan Terkini dalam Kimia: Inovasi Material, Energi, dan Kesehatan untuk Masa Depan Berkelanjutan”** dapat diselesaikan dengan baik.

Buku bunga rampai ini disusun sebagai wadah untuk menghimpun berbagai gagasan, hasil penelitian, dan kajian ilmiah yang menggambarkan perkembangan mutakhir ilmu kimia dalam menjawab tantangan tersebut. Beragam topik yang disajikan mencakup inovasi material, Energi Berkelanjutan, dan Kesehatan Lingkungan. Melalui pembahasan yang komprehensif, buku ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih luas mengenai peran strategis ilmu kimia dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Oleh karena itu, kami menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh penulis yang telah berkontribusi melalui pemikiran, pengalaman, dan hasil karya ilmiahnya.

Kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan pada penerbitan berikutnya.

Bogor, 03 Juli 2026
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
PENDAHULUAN-Jumriah Nur	6
BAB 1. DESAIN KATALIS BERBASIS METAL-ORGANIC FRAMEWORKS (MOFS) UNTUK REAKSI KIMIA HIJAU- Aisyah	9
A. Pendahuluan	9
B. Klasifikasi dan Karakteristik MOF untuk Katalisis Hijau	10
C. Sintesis MOF.....	16
D. Mekanisme Katalisis MOF dalam Reaksi Hijau	26
E. Tantangan dan Prospek Katalisis MOF dalam Reaksi Hijau	32
F. Penutup	33
G. Daftar Pustaka	35
BAB 2. KIMIA BIOELEKTROKIMIA: POTENSI DALAM BIOREAKTOR DAN PRODUKSI ENERGI BERBASIS MIKROBA-Ummi Zahra	57
A. Pendahuluan	57
B. Konsep Dasar Bioreaktor	60
C. Mikroba Penghasil Energi	62
D. Produksi Energi Berbasis Mikroba	73
E. Optimasi Produksi Energi dalam Bioreaktor	76
F. Aplikasi dan Implementasi.....	80
G. Tantangan dan Prospek.....	82

H. Penutup.....	84
I. Daftar Pustaka	85
BAB 3. PEMANFAATAN BIOPOLIMER CERDAS	
UNTUK KEMASAN AKTIF DAN	
PENGAWETAN PANGAN-Ummi Zahra.....91	
A. Pendahuluan	91
B. Konsep Biopolimer Cerdas	93
C. Jenis dan Sumber Biopolimer	96
D. Inovasi Kemasan Cerdas Berbasis Biopolimer	98
E. Produksi Energi Berbasis Mikroba	101
F. Aplikasi pada Produk Pangan	104
G. Daftar Pustaka	108
BAB 4. KIMIA SENSOR FLUORESENSI DALAM	
DETEKSI POLUTAN DAN BIOMARKER	
PENYAKIT- Arfiani Nur 110	
A. Pendahuluan	110
B. Dasar Teori Fluoresensi	112
C. Desain Sensor Fluoresensi.....	115
D. Aplikasi dalam Deteksi Polutan	120
E. Aplikasi dalam Deteksi Biomarker Penyakit	123
F. Tantangan dan Prospek Masa Depan Sensor Fluoresensi.....	126
G. Penutup	129
H. Daftar Pustaka	131
BAB 5. PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA UNTUK	
PRODUKSI BIOFUEL DAN BAHAN KIMIA	
BERNILAI TINGGI- Rina Setyawati 137	

A. Pendahuluan	137
B. Jenis dan Sumber Biomassa	138
C. Produk Biomassa	139
D. Konversi Biomassa Menjadi Bahan Kimia Bernilai tinggi.....	140
E. Potensi Pengembangan Biomassa	144
F. Dampak Lingkungan dan Keberlanjutan.....	147
G. Penutup.....	147
H. Daftar Pustaka	148
PENUTUP- Jumriah Nur	151
GLOSARIUM	153
BIOGRAFI EDITOR	157
BIOGRAFI PENULIS	158
SINOPSIS	163

PENDAHULUAN

Oleh: Jumriah Nur

Perkembangan ilmu kimia dalam beberapa dekade terakhir telah mengalami transformasi yang sangat pesat. Kimia tidak lagi hanya berperan sebagai ilmu dasar yang mempelajari struktur, sifat, dan perubahan materi, tetapi telah berkembang menjadi fondasi utama dalam berbagai inovasi yang mendukung pembangunan berkelanjutan. Tantangan global yang dihadapi dunia saat ini, seperti krisis energi, perubahan iklim, pencemaran lingkungan, meningkatnya kebutuhan pangan, serta masalah kesehatan, menuntut hadirnya solusi berbasis ilmu pengetahuan. Dalam konteks tersebut, ilmu kimia memiliki kontribusi yang sangat penting diantaranya dalam membuat material baru, mengembangkan teknologi energi, meningkatkan kualitas kesehatan masyarakat, serta menciptakan proses industri yang lebih ramah lingkungan.

Salah satu arah perkembangan kimia saat ini adalah penerapan prinsip-prinsip kimia hijau yang menekankan efisiensi penggunaan sumber daya, pengurangan limbah, penggunaan bahan yang lebih aman, serta pemanfaatan energi secara berkelanjutan. Pendekatan ini telah mendorong lahirnya berbagai inovasi, mulai dari

pengembangan katalis berbasis Metal-Organic Frameworks (MOFs), teknologi bioelektrokimia untuk produksi energi, material berbasis biopolimer yang dapat terdegradasi secara alami, hingga sensor kimia berpresisi tinggi untuk deteksi dini polutan dan biomarker penyakit. Berbagai inovasi tersebut menunjukkan bahwa ilmu kimia mampu dalam mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*), khususnya pada sektor energi, industri, dan lingkungan.

Buku bunga rampai ini disusun sebagai media ilmiah yang menghimpun berbagai gagasan, hasil penelitian, dan kajian akademik dari para penulis yang memiliki kompetensi pada bidangnya masing-masing. Kehadiran buku ini diharapkan mampu memberikan gambaran mengenai arah perkembangan ilmu kimia kontemporer serta kontribusinya dalam menjawab berbagai tantangan masa depan.

Secara sistematis, buku ini membahas berbagai topik yang mewakili perkembangan terkini dalam bidang kimia. Bab pertama mengulas desain katalis berbasis Metal-Organic Frameworks (MOFs) untuk mendukung reaksi kimia hijau yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Pembahasan selanjutnya mencakup teknologi bioelektrokimia yang menawarkan peluang pemanfaatan mikroorganisme dalam produksi energi dan pengolahan limbah. Buku ini juga mengupas

pengembangan biopolimer cerdas untuk kemasan aktif dan pengawetan pangan, yang menjadi alternatif terhadap penggunaan plastik konvensional. Selain itu, dibahas pula pemanfaatan sensor fluoresensi dalam deteksi polutan lingkungan dan biomarker penyakit yang mendukung sistem diagnostik modern. Berbagai topik lainnya turut memperkaya pembahasan mengenai peran ilmu kimia dalam inovasi material, teknologi kesehatan, dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

Penyusunan buku ini memiliki beberapa tujuan utama. Pertama, menyediakan referensi ilmiah yang menyajikan perkembangan terbaru dalam berbagai cabang ilmu kimia. Kedua, memperkuat pemahaman mengenai hubungan antara penelitian kimia dengan kebutuhan pembangunan berkelanjutan. Ketiga, mendorong lahirnya ide-ide inovatif dan kolaboratif yang dapat dikembangkan lebih lanjut dalam kegiatan penelitian maupun penerapan teknologi. Keempat, memperluas wawasan pembaca mengenai peluang pemanfaatan ilmu kimia dalam menyelesaikan berbagai persoalan global.

Kami berharap buku bunga rampai ini dapat memberikan manfaat bagi dosen, peneliti, mahasiswa, praktisi industri, maupun pembaca umum yang memiliki perhatian terhadap perkembangan ilmu kimia dan menjadi sarana diseminasi pengetahuan sekaligus sumber inspirasi bagi lahirnya inovasi-inovasi baru.

BAB 1

DESAIN KATALIS BERBASIS METAL- ORGANIC FRAMEWORKS (MOFS) UNTUK REAKSI KIMIA HIJAU

Oleh: Aisyah

A. Pendahuluan

Prioritas dalam proses kimia berkelanjutan saat ini adalah penanganan masalah lingkungan yang kompleks, seperti pencemaran dan emisi gas rumah kaca. Kimia hijau menawarkan pendekatan ilmiah dengan menggantikan proses konvensional menjadi teknologi yang lebih aman, hemat energi, dan ramah lingkungan. Ini dapat dilakukan dengan menerapkan 12 prinsip yang menekankan efisiensi, penggunaan bahan terbarukan, serta pengurangan limbah berbahaya.

Di antara prinsip-prinsip yang ada, katalisis memiliki peran penting karena kemampuannya untuk memfasilitasi reaksi selektif dalam kondisi yang lebih ringan. Dengan menggunakan katalis, energi aktivasi dapat diturunkan, kebutuhan akan energi panas atau tekanan tinggi dapat dikurangi, dan pembentukan produk samping yang tidak diinginkan dapat diminimalkan. Dalam konteks ini, *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) menunjukkan potensi besar sebagai katalis yang ramah lingkungan. MOFs adalah material kristalin berpori yang terdiri dari simpul logam dan penghubung organik, dengan struktur yang dapat

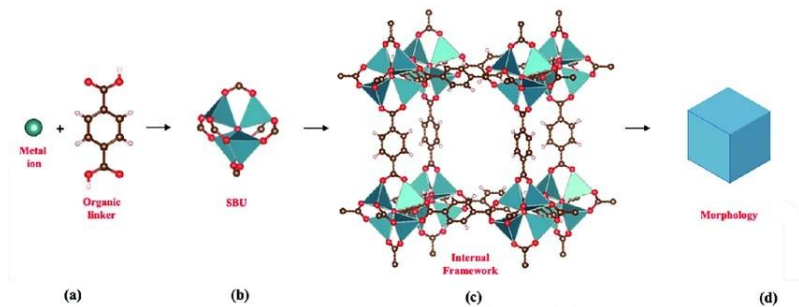
disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan reaksi tertentu (Gao *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024). Karakteristik unik ini memungkinkan integrasi antara situs aktif katalitik dan saluran pori yang terkontrol, sehingga meningkatkan difusi molekul reaktan dan efisiensi reaksi (Kong *et al.*, 2024; Xie *et al.*, 2024).

Dengan fleksibilitas desain yang tinggi, MOFs dapat diarahkan untuk mendukung berbagai prinsip kimia hijau. Material ini mampu meningkatkan selektivitas reaksi, menggantikan pelarut berbahaya dengan medium ramah lingkungan seperti air, serta memungkinkan jalannya proses pada kondisi energi yang lebih rendah. Keunggulan tersebut menjadikan MOFs relevan tidak hanya dalam mengefisienkan penggunaan sumber daya, tetapi juga dalam menekan dampak lingkungan dari reaksi kimia (Duarte *et al.*, 2025; Rastin *et al.*, 2025). Potensi ini memperlihatkan bahwa MOFs dapat berperan sebagai katalis yang adaptif dan berkelanjutan untuk berbagai aplikasi industri.

B. Klasifikasi dan Karakteristik MOF untuk Katalisis Hijau

Metal–Organic Frameworks (MOFs) terdiri dari berbagai struktur yang dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis logam, penghubung organik (linker), dan pola porositasnya. Klasifikasi ini penting karena menentukan jenis reaksi yang dapat dioptimalkan, sifat aktif situs katalitik (J. Han *et al.*, 2019), serta kestabilan material dalam kondisi reaksi yang berbeda (Yu *et al.*, 2025). Dalam konteks katalisis hijau, pemilihan jenis MOF

yang tepat memungkinkan pemanfaatan sumber daya secara efisien sekaligus meminimalkan pembentukan limbah dan penggunaan energi berlebih. Setiap kategori MOF memiliki keunggulan dan keterbatasan spesifik yang memengaruhi efektivitasnya dalam mendukung reaksi ramah lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap karakteristik struktural dan fungsional dari setiap jenis MOF menjadi langkah krusial untuk perancangan katalis yang berkelanjutan.



Gambar 1. Struktur primer MOF dengan komposisi ion logam dan linker organik (Mittal *et al.*, 2022).

1. MOF Berbasis Logam Transisi (Blok d)

MOF berbasis logam transisi seperti Fe, Cu, Ni, atau Co memiliki ciri khas berupa situs aktif dengan koordinasi rendah, yaitu jumlah ligan yang terikat pada pusat logam lebih sedikit dari kondisi jenuhnya. Hal ini menciptakan ruang koordinasi terbuka yang memudahkan interaksi dengan molekul reaktan, sehingga transfer elektron berlangsung efisien dan reaktivitas katalitik meningkat (Cai *et al.*, 2024; Qiao *et al.*, 2019; J.-L. Sun *et al.*, 2018;

Thacker *et al.*, 2017). Keunggulan ini membuatnya unggul untuk reaksi oksidasi, reduksi, dan C–C coupling yang memerlukan aktivasi molekul cepat. Namun, sifat koordinasi rendah juga membuat struktur lebih rentan terhadap degradasi akibat oksidasi atau hidrolisis, karena ikatan logam–ligan relatif lemah dan mudah terganggu oleh kelembapan atau pelarut polar. Oleh karena itu, meskipun MOF jenis ini sangat efektif untuk oksidasi selektif alkohol, degradasi polutan organik (Farwa *et al.*, 2024; Terrón *et al.*, 2025), dan reduksi nitroaromatic (L. Zhang *et al.*, 2016), perlindungan struktural atau modifikasi pasca-sintesis (Ferreira *et al.*, 2024; Jurić *et al.*, 2025) sering diperlukan untuk mempertahankan stabilitas jangka panjang.

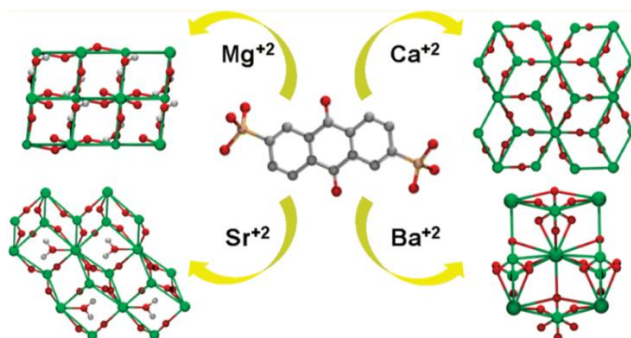
2. MOF Berbasis Logam p-Blok

Logam p-blok yang umum digunakan pada MOF meliputi Al, Ga, In (golongan 13) serta Sn, Pb (golongan 14). Logam-logam ini memiliki orbital p sebagai kulit valensi utama yang cenderung membentuk ikatan kovalen kuat dengan oksigen pada linker, menghasilkan kerangka yang kaku dan stabil terhadap panas maupun kondisi kimia agresif. Beberapa literatur mengelompokkan MOF berbasis Zr dan Ti dalam kategori ini, padahal secara tabel periodik keduanya termasuk logam transisi (blok d, golongan 4). Ini disebabkan karena Zr (IV) dan Ti(IV) membentuk kluster oksida yang sangat stabil dan inert terhadap pelarut atau reaktan agresif, karakteristik yang menyerupai sifat oksida kovalen dari logam p-blok (Li *et al.*, 2023; K. Zhang *et al.*, 2016). MOF jenis ini, seperti UiO-66 (Zr) atau MIL-125 (Ti), sangat cocok untuk reaksi yang memerlukan

ketahanan tinggi seperti fiksasi CO₂ (K. Zhang *et al.*, 2016) dan fotokatalisis. (G.-Y. Han *et al.*, 2025; D. Sun & Li, 2017). Kelebihannya adalah stabilitas termal dan kimia yang luar biasa, namun kelemahannya adalah keterbatasan dalam fleksibilitas elektron sehingga kurang optimal untuk reaksi redoks multi tahap tanpa modifikasi tambahan (Joshi *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2018; Solé-Daura *et al.*, 2024; Yadav & Kanoo, 2019)

3. MOF Berbasis Logam Alkali Tanah

Logam alkali tanah seperti Mg, Ca, dan Sr memberikan sifat unik pada MOF karena kationnya memiliki karakter asam Lewis yang terdefinisi jelas. Ukuran ion yang relatif besar juga mempengaruhi geometri dan ukuran pori kerangka yang merupakan karakter penting pada MOF (Dhakshinamoorthy *et al.*, 2020). Keunggulan utama MOF jenis ini adalah toksisitas rendah, ketersediaan melimpah, dan harga yang relatif murah, membuatnya menarik untuk aplikasi industri skala besar (Matlinska *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2024; Ye *et al.*, 2021) Sifat hidrofiliknya mendukung stabilitas dalam media berair, sehingga cocok untuk reaksi transesterifikasi minyak nabati, konversi biomassa menjadi biofuel, serta reaksi hidrolisis yang ramah lingkungan. Namun, karena logam alkali tanah memiliki kemampuan redoks yang terbatas, aktivitas katalitiknya pada reaksi yang memerlukan transfer elektron sering lebih rendah dibanding MOF berbasis logam transisi. Oleh sebab itu, modifikasi melalui penambahan gugus fungsional atau impregnasi logam transisi sering dilakukan untuk memperluas cakupan reaksi katalitik (Solé-Daura *et al.*, 2024; Yadav & Kanoo, 2019).



Gambar 2. Beberapa MOF berbasis logam alkali tanah (Zhang & Fei, 2019)

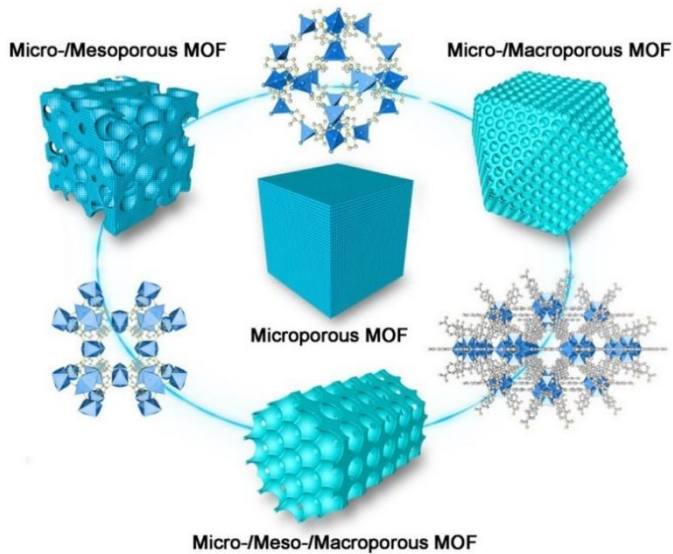
4. MOF Terfungsionalisasi Linker Organik

Fungsionalisasi linker organik pada MOF merupakan strategi efektif untuk meningkatkan selektivitas dan efisiensi katalitik tanpa mengubah kerangka logam. Fungsionalisasi linker dengan penambahan gugus amina (Pizzanelli *et al.*, 2020; Seth *et al.*, 2015), fenil (Choi *et al.*, 2015), hidroksil (Mendes *et al.*, 2018), benzen dikarboksilat (Mehmood *et al.*, 2025) atau gugus donor elektron lainnya dapat mengatur kepolaran dan kekuatan interaksi dengan molekul substrat, sehingga sangat berguna dalam reaksi yang memerlukan orientasi molekul spesifik, seperti kondensasi Knoevenagel, esterifikasi, atau polimerisasi selektif. Keunggulan pendekatan ini adalah fleksibilitasnya untuk menyisipkan gugus fungsional selama sintesis (*direct functionalization*) atau setelah kerangka terbentuk melalui *post-synthetic modification* (PSM), memungkinkan penyesuaian cepat terhadap kebutuhan reaksi (Lim *et al.*, 2021; Shultz *et al.*, 2011).

Kekurangannya adalah beberapa gugus fungsional dapat mengalami degradasi termal atau kimia di bawah kondisi reaksi keras, sehingga perlu optimasi kondisi operasi dan pemilihan gugus yang stabil (Dhakshinamoorthy *et al.*, 2020).

5. MOF Pori Hierarkis

MOF berpori hierarkis menggabungkan pori mikro (<2 nm) dengan pori meso (2–50 nm), menciptakan jalur difusi yang lebih baik untuk molekul besar dan mengurangi hambatan transportasi massa. Penciptaan porositas bertingkat ini dapat dicapai melalui strategi *linker labilization*, *hard templating*, atau *soft templating*. Keunggulannya adalah peningkatan laju reaksi dan aksesibilitas situs aktif pada reaksi (Liu *et al.*, 2022) yang melibatkan biomolekul, polimer alam, atau substrat dengan ukuran besar, seperti pada katalisis enzim tiruan dan konversi lignoselulosa serta peningkatan konversi elektrik pada material termoelektrik (Redel & Baumgart, 2020). Kekurangannya meliputi sintesis yang lebih kompleks, biaya produksi lebih tinggi, serta potensi penurunan stabilitas struktur pori meso setelah proses regenerasi atau siklus reaksi berulang (Fan & Li, 2022). Meski demikian, kemampuan menggabungkan stabilitas MOF dengan kinerja difusi yang baik menjadikan MOF hierarkis salah satu kandidat terkuat untuk katalis generasi berikutnya dalam proses hijau berskala industri (Wu *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2017).



Gambar 3. Klasifikasi MOF berdasarkan struktur pori; mikopori, mesopore dan makropori (Kabtamu, *et al.*, 2020)

C. Sintesis MOF

Strategi desain katalis berbasis MOF ditentukan pada tahap perancangan, langkah selanjutnya adalah mewujudkannya melalui proses sintesis yang terkontrol. Sintesis tidak hanya bertujuan membentuk kerangka kristalin, tetapi juga memastikan bahwa sifat porositas, distribusi situs aktif, dan kestabilan struktural sesuai dengan fungsi katalitik yang diinginkan. Dalam konteks reaksi kimia hijau, keberhasilan sintesis memiliki peran ganda: menghasilkan material dengan kinerja tinggi sekaligus meminimalkan dampak lingkungan selama proses pembuatannya. Hubungan antara desain dan

sintesis sangat erat. Rancangan struktur yang ideal akan sia-sia jika metode sintesis tidak mampu mempertahankan atau meningkatkan fitur yang telah direncanakan. Pemilihan metode sintesis MOF, baik konvensional maupun berbasis prinsip kimia hijau, bergantung pada sejumlah faktor seperti sensitivitas termal komponen, kelarutan prekursor, hingga kompatibilitas dengan pelarut ramah lingkungan.(Kochetygov *et al.*, 2024). Sintesis hijau MOF juga menghadapi tantangan teknis tersendiri. Beberapa di antaranya adalah pengendalian morfologi kristal, reproduktifitas hasil, serta integrasi gugus fungsional tanpa mengorbankan integritas kerangka (Dai *et al.*, 2021). Prinsip-prinsip kimia hijau, seperti pencegahan limbah, penggunaan pelarut aman, dan efisiensi energi, menjadi pertimbangan utama. Metode sintesis yang tepat tidak hanya akan memperkuat sifat katalitik yang diinginkan, tetapi juga memfasilitasi penerapan MOF secara lebih luas pada proses-proses industri yang berkelanjutan. Dengan demikian, bagian ini akan mengulas berbagai aspek sintesis katalis berbasis MOF secara sistematis, dimulai dari penyesuaian desain struktur untuk kebutuhan reaksi hijau, parameter sintesis yang memengaruhi hasil akhir, hingga penerapan metode konvensional dan inovatif yang mendukung produksi material berkinerja tinggi dan ramah lingkungan.

1. Desain Struktur MOF untuk Katalisis

Dalam sintesis katalis berbasis MOF, rancangan struktur merupakan tahap awal yang sangat menentukan kinerja material dalam reaksi hijau. Desain yang baik harus mempertimbangkan interaksi antara komponen penyusun MOF yaitu simpul logam (metal nodes) dan penghubung organik (linkers) dengan karakteristik reaksi yang akan difasilitasi (Pal, 2022). Pendekatan ini tidak berhenti pada pemilihan komponen, tetapi juga melibatkan pengaturan morfologi kristal, distribusi pori, serta sifat permukaan agar reaktivitas kimia dapat dioptimalkan (Sailaja *et al.*, 2024).

Karakter substrat menjadi pertimbangan utama. Molekul berukuran besar atau bercabang memerlukan struktur berpori hierarkis yang menggabungkan pori mikro dan meso, sehingga hambatan difusi dapat diminimalkan. Sebaliknya, untuk substrat kecil, pori mikro yang seragam memberikan keuntungan karena dapat memperkuat interaksi dengan situs aktif dan meningkatkan selektivitas reaksi (G. Li & Han, 2022). Penentuan ukuran dan geometri pori ini umumnya dikontrol melalui pemilihan panjang linker, sudut koordinasi logam, dan penggunaan templating agents.

Sifat kimia reagen juga memengaruhi desain struktur. Reagen polar akan lebih kompatibel dengan kerangka MOF yang memiliki gugus fungsional hidrofilik, sedangkan reagen non-polar cenderung memerlukan

kerangka hidrofobik untuk meningkatkan afinitas masuk ke dalam pori. Penyesuaian ini dapat dilakukan baik melalui modifikasi linker sejak awal sintesis, maupun melalui *post-synthetic modification* (PSM) untuk menambahkan gugus fungsional tanpa mengubah struktur utama kerangka (Song, 2021).

Kondisi reaksi yang diinginkan termasuk suhu, pH, dan jenis pelarut, berpengaruh besar pada pemilihan logam pusat. Reaksi bersuhu tinggi atau media asam kuat memerlukan logam dengan ikatan koordinasi yang kokoh, seperti Zr(IV) atau Al(III), yang mampu mempertahankan stabilitas struktur. Sementara itu, reaksi bersuhu rendah atau yang membutuhkan situs koordinasi terbuka lebih sesuai menggunakan logam seperti Co(II) atau Ni(II) (He *et al.*, 2021). Perpaduan antara sifat logam dan desain linker akan menentukan kestabilan termal, kimia, serta ketersediaan situs aktif selama reaksi berlangsung (Samanidou & Deliyanni, 2020).

Dengan mengintegrasikan pertimbangan substrat, reagen, dan kondisi reaksi, desain struktur MOF dapat diarahkan untuk mencapai keseimbangan antara aktivitas, selektivitas, dan stabilitas. Pendekatan ini memastikan bahwa hasil sintesis benar-benar merepresentasikan rancangan awal, sekaligus memenuhi tuntutan efisiensi dan keberlanjutan yang menjadi prinsip utama kimia hijau.

2. Parameter Umum Sintesis MOF

Keberhasilan sintesis MOF sangat dipengaruhi oleh sejumlah parameter kunci yang menentukan ukuran kristal, morfologi, luas permukaan, porositas, dan distribusi situs aktif. Salah satu parameter utama adalah konsentrasi prekursor, baik logam maupun linker organik (Carpenter *et al.*, 2023).. Konsentrasi tinggi cenderung mempercepat nukleasi sehingga menghasilkan kristal berukuran kecil, sementara konsentrasi rendah memungkinkan pertumbuhan kristal yang lebih besar dan teratur (Griffin *et al.*, 2020).

Jenis pelarut juga memainkan peran penting. Pelarut polar aprotik seperti dimetilformamida (DMF) sering digunakan pada metode solvothermal karena mampu melarutkan sebagian besar prekursor logam dan organik (Marino *et al.*, 2021), serta membantu membentuk kerangka yang stabil (S. Chen *et al.*, 2024). Dalam pendekatan kimia hijau, pelarut air atau etanol menjadi pilihan utama karena ramah lingkungan, meskipun sering kali memerlukan optimasi kondisi untuk menghindari penurunan kualitas kristal.

Suhu dan waktu reaksi memengaruhi kinetika nukleasi dan pertumbuhan kristal. Suhu tinggi pada metode yang menggunakan radiasi gelombang mikro mempercepat pembentukan MOF, tetapi dapat mengakibatkan degradasi linker organik yang termolabil atau menurunkan keteraturan struktur (Bag *et al.*, 2015; Zorainy *et al.*, 2022). Sebaliknya, waktu reaksi yang terlalu singkat dapat menghasilkan kerangka yang belum

sepenuhnya terbentuk (Gómez-Oliveira *et al.*, 2022). Waktu reaksi yang tepat memungkinkan pembentukan ikatan koordinasi yang maksimal dan memungkinkan adanya penataan ulang kerangka serta mengoptimalkan aktivitas katalitik MOF (S. Lee *et al.*, 2024).

pH sistem reaksi menentukan muatan permukaan dan kestabilan koordinasi logam-linker. MOF berbasis logam alkali tanah dan logam transisi umumnya stabil pada pH netral hingga sedikit asam (Asgharnejad *et al.*, 2019), (M. Yang *et al.*, 2025) sementara MOF berbasis logam seperti Al atau Cr dapat terbentuk dalam pH yang lebih rendah (S. Li *et al.*, 2025). Pengaturan pH sering dilakukan melalui penambahan modulator, seperti asam asetat atau asam format, yang juga berfungsi mengontrol ukuran pori. Selain itu, kecepatan pengadukan dan penggunaan agen penambah kristalisasi seperti surfactants atau templating agents dapat digunakan untuk mengontrol morfologi dan porositas (Bagi *et al.*, 2021). Pemahaman menyeluruh terhadap interaksi setiap parameter memungkinkan peneliti untuk mengoptimalkan kondisi sintesis sesuai dengan rancangan awal yang diinginkan.

3. Metode Sintesis Konvensional

Metode sintesis konvensional untuk MOF telah berkembang selama dua dekade terakhir, dengan teknik solvothermal dan hidrotermal sebagai pendekatan paling umum (Han *et al.*, 2025). Pada metode solvothermal,

campuran prekursor logam dan linker organik dilarutkan dalam pelarut organik dengan titik didih tinggi, seperti DMF atau DEF, lalu dipanaskan dalam reaktor tertutup pada suhu 80–220 °C selama beberapa jam hingga hari (Pitt *et al.*, 2025; Yi *et al.*, 2024). Metode ini efektif menghasilkan kristal berkualitas tinggi dengan ukuran dan bentuk yang seragam, namun sering kali memerlukan pelarut toksik dan energi tinggi. Metode hidrotermal menggunakan air sebagai pelarut utama, sehingga lebih ramah lingkungan pada suhu yang lebih rendah, 90-120°C (D'Amato *et al.*, 2021; X. Zhao *et al.*, 2017). Meskipun demikian, tidak semua linker organik memiliki kelarutan memadai dalam air, sehingga perlu penambahan kosolven (Iram *et al.*, 2024), pelarut ionik (Vaid *et al.*, 2017), pilihan jalur sintesis alternatif seperti mekanokimia (D'Amato *et al.*, 2021), ionothermal (Azbell *et al.*, 2023) dan penggunaan surfaktan sebagai penstabil fasa koloidal MOF-linker (Leroy *et al.*, 2024). Kelemahan utama metode konvensional adalah konsumsi energi dan pelarut yang relatif tinggi. Oleh karena itu, dalam dekade terakhir muncul tren untuk mengadaptasi metode konvensional ke dalam format yang lebih berkelanjutan melalui penggantian pelarut, optimasi suhu, dan pemanfaatan teknologi pemanas cepat seperti *microwave-assisted synthesis*.

4. Metode Sintesis Hijau

Metode sintesis hijau bertujuan mengurangi atau menghilangkan penggunaan pelarut berbahaya, menurunkan konsumsi energi, dan meminimalkan limbah. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah sintesis berbasis pelarut air. Air bukan hanya pelarut yang aman, tetapi juga sering berperan dalam mengarahkan pembentukan ikatan koordinasi yang lebih stabil melalui efek hidrolisis terkontrol. Sintesis bebas pelarut (*solvent-free*) menjadi alternatif menarik, di mana prekursor logam dan linker organik dicampur secara mekanis menggunakan *ball milling* (H. K. Lee *et al.*, 2021; R. Lin *et al.*, 2022). Teknik ini tidak hanya menghilangkan limbah cair, tetapi juga mempercepat waktu reaksi menjadi hitungan menit hingga jam. *Microwave-assisted synthesis* dalam media ramah lingkungan, seperti etanol atau campuran air-etanol, juga banyak diterapkan (Arenas-Vivo *et al.*, 2020). Pemanasan gelombang mikro memberikan energi secara cepat dan merata, mempersingkat waktu sintesis, serta memungkinkan pengendalian morfologi kristal (Griffin *et al.*, 2020). Pendekatan ultrasonikasi memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk mempercepat pembentukan nukleasi (Yi *et al.*, 2024). Selain hemat energi, teknik ini memungkinkan pembentukan kristal dengan ukuran nano, yang bermanfaat untuk memperluas area permukaan aktif pada aplikasi katalisis. Metode sintesis

hijau secara keseluruhan memberikan jalan menuju produksi MOF yang lebih sesuai dengan prinsip kimia hijau, tanpa mengorbankan kualitas material yang dihasilkan.

5. Sintesis Berbasis Prekursor Terkontrol & Modifikasi Pasca Sintesis (PSM)

Pendekatan berbasis prekursor terkontrol melibatkan penggunaan prekursor logam atau organik yang telah dimodifikasi untuk menghasilkan kerangka dengan sifat tertentu. Misalnya, prekursor logam dengan ligan pendamping dapat memperlambat laju nukleasi, sehingga memungkinkan pertumbuhan kristal yang lebih teratur. Modifikasi pasca sintesis (PSM) adalah strategi penting untuk menambahkan fungsi spesifik pada MOF tanpa mengubah kerangka utamanya (H. Lin *et al.*, 2022). PSM dapat dilakukan melalui pertukaran ligan (ligand exchange), penambahan gugus fungsional, atau infiltrasi molekul aktif ke dalam pori (Mandal *et al.*, 2020). Keunggulan PSM adalah fleksibilitasnya: satu jenis MOF dapat dimodifikasi menjadi berbagai varian sesuai kebutuhan reaksi (Gadzikwa & Matseketsa, 2024). Misalnya, MOF yang awalnya bersifat hidrofobik dapat difungsionalisasi menjadi hidrofilik untuk meningkatkan afinitas terhadap substrat polar. Kombinasi prekursor terkontrol dan PSM memungkinkan pencapaian sifat katalitik yang tidak dapat diperoleh hanya melalui desain

awal, sehingga memperluas potensi aplikasi MOF pada reaksi kimia hijau yang beragam.

6. Sintesis MOF Berstruktur Hierarkis & Komposit

MOF berstruktur hierarkis menggabungkan pori mikro, meso, dan makro dalam satu material, memberikan jalur difusi yang lebih efisien bagi molekul reaktan dan produk. Struktur ini sangat berguna untuk reaksi yang melibatkan molekul besar atau multi-tahap, seperti konversi biomassa menjadi bahan kimia bernilai tinggi. Pembentukan porositas hierarkis dapat dicapai melalui penggunaan hard templates (misalnya partikel silika atau polistirena yang dihilangkan setelah sintesis (Doustkhah *et al.*, 2021) atau soft templates (surfaktan atau polimer (K. Li *et al.*, 2023; Tan *et al.*, 2025)). Teknik ini memastikan konektivitas antar pori sehingga mempercepat transportasi massa tanpa kehilangan luas permukaan internal. Sementara itu, komposit MOF mengintegrasikan MOF dengan material lain, seperti oksida logam, karbon berpori, atau polimer konduktif. Pendekatan ini dapat meningkatkan stabilitas mekanik (Ma *et al.*, 2019), konduktivitas listrik (John *et al.*, 2025), atau memberi fungsi katalitik tambahan yang tidak dimiliki MOF tunggal (Iram *et al.*, 2024; Tong *et al.*, 2019). Strategi struktur hierarkis dan pembentukan komposit ini memberikan fleksibilitas tinggi dalam merancang katalis untuk reaksi hijau yang memiliki aktivitas tinggi dan daya

tahan terhadap kondisi operasi ekstrem (M. Chen *et al.*, 2024; Weng *et al.*, 2024).

D. Mekanisme Katalisis MOF dalam Reaksi Hijau

Katalisis hadir sebagai salah satu pilar untuk mewujudkan transformasi kimia yang lebih selektif, hemat energi, dan minim limbah. Sebagai dukungan terhadap transformasi ini, Material Organik Logam (MOF) menjadi kandidat katalis unggulan karena memadukan porositas tinggi, keragaman kimia, serta fleksibilitas desain yang memungkinkan pengaturan sifat katalitik secara presisi. Keunggulan MOF terletak pada kemampuan pusat logam dan ligan organiknya untuk membentuk situs aktif yang multifungsi (Duan *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2025), sehingga reaksi dapat berlangsung dengan efisiensi atom tinggi dan produk samping yang lebih sedikit (Gadzikwa & Matseketsa, 2024; T. Zhao *et al.*, 2025). Selain itu, sifat MOF yang dapat digunakan kembali dan bekerja pada kondisi reaksi yang lebih ringan menjadikannya sejalan dengan prinsip-prinsip utama kimia hijau (C. Wu & Zhao, 2017). Oleh karena itu, pemahaman tentang mekanisme katalisis berbasis MOF sangat penting, sangat untuk mendukung inovasi berkelanjutan di bidang industri kimia.

1. Aktivasi Substrat dalam MOF

Salah satu keunggulan utama MOF sebagai katalis adalah kemampuannya mengaktifkan substrat melalui mekanisme asam–basa. Pusat logam pada kerangka bertindak sebagai asam Lewis yang mampu mengkoordinasikan gugus karbonil atau heteroatom, sementara gugus fungsional pada linker organik berperan sebagai basa Brønsted (Behera *et al.*, 2024; Cirujano & Llabrés I Xamena, 2020). Kombinasi ini menjadikan MOF sebagai katalis bifungsional yang dapat memfasilitasi reaksi organik dengan efisiensi tinggi (Xu *et al.*, 2023). Dalam reaksi hijau, mekanisme ini sangat relevan untuk reaksi multikomponen (MCRs) yang memungkinkan pembentukan molekul kompleks hanya dalam satu tahap, sehingga mengurangi jumlah pelarut, energi, dan limbah kimia. Sebagai contoh, MOF berbasis Zr seperti UiO-66 telah digunakan untuk katalisis reaksi kondensasi antara aldehida dan alkohol (Sittiwong *et al.*, 2021). Di sini, pusat Zr^{4+} mengaktifkan gugus karbonil, sementara gugus $-\text{OH}$ pada linker menstabilkan semua spesi pada permukaan energi potensial sehingga menghasilkan produk dengan selektivitas tinggi.

Mekanisme asam–basa ganda pada MOF Zr membantu mempercepat pembentukan intermediat kationik dan menstabilkan keadaan transisi, yang sulit dicapai dengan katalis homogen konvensional (Zhang *et al.*, 2020). Keunggulan sistem ini terletak pada

kemampuan pusat Zr untuk menyediakan situs asam Lewis yang stabil, sedangkan kerangka berpori MOF mendukung difusi substrat secara efisien (P. Yang *et al.*, 2018; Yoskamtorn *et al.*, 2021). Dengan cara ini, MOF bukan hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga secara inheren mendukung prinsip-prinsip kimia hijau melalui minimisasi langkah sintesis dan pengurangan limbah.

2. Katalisis Redoks dalam MOF

Katalisis redoks pada MOF berperan melalui perubahan bilangan oksidasi logam pusat secara reversibel, memungkinkan berlangsungnya siklus oksidasi–reduksi dalam kondisi yang relatif ringan. Misalnya, pada oksidasi alkohol aromatik menjadi aldehida menggunakan Fe-MOF dengan H_2O_2 , pusat Fe^{3+} berfungsi sebagai akseptor elektron, berubah menjadi Fe^{2+} , lalu kembali teroksidasi oleh H_2O_2 sehingga siklus dapat berulang. Proses ini menghasilkan konversi tinggi dengan selektivitas baik dan meminimalkan produk samping (Ding *et al.*, 2019). Contoh lain adalah Cu-MOF dalam reduksi nitroaromatik menjadi amina. Pusat Cu^{2+} direduksi menjadi Cu^+ oleh donor hidrogen, (Wang *et al.*, 2023) lalu mentransfer elektron ke gugus nitro hingga terbentuk amina. Mekanisme ini menegaskan bagaimana MOF menyediakan jalur transfer elektron yang stabil sekaligus menjaga distribusi situs logam tetap merata (C. Qiao *et al.*, 2020). Pengembangan lanjutan mencakup MOF

bimetalik, misalnya kombinasi Fe–Cu, yang menawarkan sinergi katalitik: satu logam mengaktifkan oksidator, sementara logam lain mengaktifkan substrat (Y. Qiao *et al.*, 2019). Dengan cara ini, rentang reaksi redoks yang dapat difasilitasi menjadi lebih luas, sekaligus meningkatkan stabilitas struktural dalam siklus katalisis jangka panjang.

Aplikasi reaksi redoks MOF tidak hanya terbatas pada konversi substrat sederhana, tetapi juga telah berkembang ke dalam berbagai reaksi hijau spesifik. Salah satu contohnya adalah oksidasi selektif toluene menjadi benzaldehida dengan katalis MIL-101(Fe) pada suhu dan tekanan ruang. Efisiensi dan selektivitas reaksi ditingkatkan oleh kinerja optimal tahap penentu laju yaitu pada tahap aktivasi ikatan C(sp³)–H oleh radikal klorin yang dihasilkan dari ion klorida yang terkoordinasi dalam kerangka MOF (Z. Wu *et al.*, 2024). Reaksi lain adalah reduksi CO₂ menjadi metanol menggunakan Cu-BTC. Pada proses ini, CO₂ berinteraksi dengan pusat Cu²⁺ dalam MOF, yang kemudian diaktifkan melalui transfer elektron dari H₂ sebagai reduktan. Komposit CuO/ZnO/Cu-BTC menunjukkan peningkatan aktivitas katalitik, kemampuan anti-deaktivasi, dan stabilitas pada suhu tinggi dibandingkan dengan katalis CuO/ZnO konvensional, yang mengimplikasikan peran Cu-BTC dalam memfasilitasi dispersi spesies tembaga dan stabilitas yang relevan untuk CO₂. Interaksi ini

memfasilitasi konversi CO₂ menjadi produk yang lebih bernilai, menunjukkan potensi MOF dalam menurunkan emisi gas rumah kaca (Yu *et al.*, 2020). Selain itu, hidrogenasi selektif juga menjadi area penting dalam katalisis redoks MOF. Pd/MOF dapat menghidrogenasi ikatan rangkap pada alkena tanpa memengaruhi gugus karbonil. Selektivitas ini dicapai karena nanopartikel Pd terdispersi homogen dalam kerangka MOF, yang menciptakan lingkungan katalitik terkontrol (Yamada *et al.*, 2020). Pada reaksi hidrogenasi stiren, reaksi dapat berlangsung pada kondisi ringan dengan efisiensi tinggi (Y. Zhong *et al.*, 2019).

3. Fotokatalisis dan Biokatalisis dengan MOF

Dalam fotokatalisis, mekanisme utama pada MOF adalah kombinasi penyerapan cahaya oleh gugus kromofor pada linker organik yang mengandung ikatan π -terkonjugasi dan transfer elektron ke pusat logam. Setelah kromofor mengalami eksitasi, pasangan elektron-hole terbentuk lalu elektron yang tereksitasi berpindah ke pusat logam atau situs akseptor, sementara hole pada linker dapat mengoksidasi substrat. Karakter kristal yang sangat teratur dengan porositas fleksibel memungkinkan penyesuaian band gap sehingga penyerapan dapat diperluas ke daerah sinar UV yang meningkatkan penangkapan radiasi cahaya yang maksimal (Xiao *et al.*, 2018). Pada MOF berbasis Ti (seperti MIL-125(Ti)), foton menginduksi transfer elektron

dari linker tereftalat ke Ti^{4+} , menghasilkan Ti^{3+} yang kemudian mereduksi CO_2 menjadi CO atau metanol, sedangkan hole mengoksidasi donor elektron (air atau organik sederhana) (Priyadarshini *et al.*, 2025) (Sun & Li, 2017). Mekanisme ini mirip dengan semikonduktor, namun porositas tinggi MOF memungkinkan difusi substrat lebih efisien.

Dalam biokatalisis, MOF berperan terutama melalui mekanisme immobilisasi enzim di dalam pori atau pada permukaan kerangka. Proses ini menciptakan lingkungan mikro yang menjaga stabilitas enzim sekaligus memfasilitasi akses substrat (An *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2020). Lipase yang terperangkap di dalam ZIF-8 mempertahankan konformasi aktifnya; substrat masuk melalui kanal pori dan dihidrolisis pada sisi aktif enzim, sementara kerangka MOF mencegah denaturasi (Maddigan *et al.*, 2021). Dalam kasus laccase@MOF, gugus fungsional dari linker berinteraksi dengan residu enzim, sehingga mempercepat transfer elektron dalam reaksi oksidasi fenolik (Ren *et al.*, 2023; Z. Zhong *et al.*, 2017). Dengan demikian, mekanisme kunci biokatalisis berbasis MOF adalah kombinasi stabilisasi struktural enzim dan peningkatan aksesibilitas substrat.

E. Tantangan dan Prospek Katalisis MOF dalam Reaksi Hijau

Meskipun MOF telah terbukti efektif pada berbagai reaksi kimia ramah lingkungan, tantangan yang cukup signifikan berasal dari penerapannya pada skala besar. Salah satu kendala utama yang dihadapi adalah stabilitas struktural terhadap kelembapan, panas, dan kondisi reaksi ekstrem. Banyak MOF dengan kerangka rapuh mudah mengalami keruntuhan, sehingga menurunkan kinerja katalitik dalam penggunaan berulang (Xie & Hou, 2025). Selain itu, ada aspek yang tidak sepenuhnya sesuai dengan prinsip kimia hijau (Dutta *et al.*, 2024; Rastin *et al.*, 2025). Beberapa metode sintesis MOF masih menggunakan pelarut organik berbahaya seperti N, N-dimethylformamide (DMF), yang menimbulkan masalah toksisitas dan limbah kimia (Hong *et al.*, 2024; Wegner *et al.*, 2021). Pemanfaatan logam berat atau logam langka seperti Cd, Cr, atau tanah jarang juga dapat menimbulkan persoalan keberlanjutan karena sifat toksik, harga tinggi, serta ketersediaan terbatas (Jannetto & Cowl, 2023). Selain itu, sintesis MOF dalam skala besar kadang memerlukan energi tinggi (Singh *et al.*, 2025), yang berlawanan dengan prinsip efisiensi energi. Namun demikian, prospek MOF sebagai katalis hijau tetap terbuka lebar. Arah penelitian terkini menekankan pengembangan MOF stabil dengan desain molekuler presisi, di mana pusat logam, jembatan oksida, dan linker

organik dapat dimodifikasi untuk meningkatkan daya tahan dan selektivitas. Perkembangan teknik sintesis hijau seperti metode microwave, sonikasi, atau penggunaan pelarut air telah mengurangi ketergantungan pada pelarut toksik (Duan *et al.*, 2020; Obeso *et al.*, 2025). Selain itu, komputasi kimia dan kecerdasan buatan kini memainkan peran penting dalam merancang MOF baru secara rasional, memungkinkan prediksi sifat katalitik s (Nadeem *et al.*, 2025) sebelum sintesis aktual dilakukan (Y. Zhao *et al.*, 2025). Dengan integrasi pendekatan eksperimental dan komputasi, di masa depan MOF diperkirakan akan mampu mengatasi kekurangannya dan benar-benar menjadi katalis yang sejalan dengan prinsip kimia hijau, baik dalam efisiensi energi, penggunaan bahan baku aman, maupun daya guna jangka panjang.

F. Penutup

Katalisis berbasis MOF telah menunjukkan kapasitas besar dalam mendorong transformasi kimia yang lebih berkelanjutan. Melalui mekanisme reaksi yang beragam seperti reaksi asam-basa, oksidasi-reduksi, fotokatalisis, hingga biokatalisis, MOF mampu mengakomodasi reaksi organik hijau yang kompleks dengan tingkat selektivitas tinggi. Penerapannya pada reaksi multi-komponen, oksidasi selektif, hidrogenasi, maupun konversi CO₂ semakin menegaskan potensinya dalam menjawab

tuntutan inovasi kimia ramah lingkungan. Walaupun demikian, sejumlah kendala masih menjadi perhatian utama. Stabilitas jangka panjang, degradasi dalam kondisi reaksi tertentu, serta penggunaan pelarut atau logam yang belum sepenuhnya ramah lingkungan menunjukkan bahwa MOF bukanlah solusi yang tanpa batas. Aspek ini menegaskan perlunya pendekatan yang lebih kritis dalam pemilihan material dan metode sintesis. Perbaikan di area ini akan menentukan sejauh mana MOF dapat benar-benar diadopsi secara luas sebagai katalis hijau yang sejalan dengan prinsip-prinsip kimia berkelanjutan. Masa depan tetap memberi prospek yang kuat bagi MOF dengan dukungan perkembangan ilmu pengetahuan. Pendekatan desain molekuler berbasis teori, simulasi komputasi, serta integrasi teknologi berbasis kecerdasan buatan diyakini mampu mengoptimalkan sifat katalitik MOF pada tingkat presisi yang belum pernah dicapai sebelumnya. Dengan arah pengembangan semacam ini, MOF berpotensi memainkan peran sentral dalam menciptakan sistem katalisis yang efisien, adaptif, dan benar-benar ramah lingkungan, menjadikannya salah satu kandidat utama untuk menjawab tantangan kimia hijau di masa mendatang.

G. Daftar Pustaka

- An, H., Song, J., Wang, T., Xiao, N., Zhang, Z., Cheng, P., Ma, S., Huang, H., & Chen, Y. (2020). Metal–Organic Framework Disintegrants: Enzyme Preparation Platforms with Boosted Activity. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(38), 16764–16769. <https://doi.org/10.1002/anie.202007827>
- Arenas-Vivo, A., Avila, D., & Horcajada, P. (2020). Phase-Selective Microwave Assisted Synthesis of Iron(III) Aminoterephthalate MOFs. *Materials*, 13(6), 1469. <https://doi.org/10.3390/ma13061469>
- Asgharnejad, L., Abbasi, A., Najafi, M., & Janczak, J. (2019). Synthesis and Structure of Three New Alkaline Earth Metal–Organic Frameworks with High Thermal Stability as Catalysts for Knoevenagel Condensation. *Crystal Growth & Design*, 19(5), 2679–2686. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b01810>
- Azbell, T. J., Pitt, T. A., Bollmeyer, M. M., Cong, C., Lancaster, K. M., & Milner, P. J. (2023). Ionothermal Synthesis of Metal–Organic Frameworks Using Low-Melting Metal Salt Precursors. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 62(17), e202218252. <https://doi.org/10.1002/anie.202218252>
- Bag, P. P., Wang, X.-S., & Cao, R. (2015). Microwave-assisted large scale synthesis of lanthanide metal-organic frameworks (Ln-MOFs), having a preferred conformation and photoluminescence properties. *Dalton Transactions*, 44(26), 11954–11962. <https://doi.org/10.1039/c5dt01598g>

- Bagi, S. D., Myerson, A. S., & Román-Leshkov, Y. (2021). Solvothermal Crystallization Kinetics and Control of Crystal Size Distribution of MOF-808 in a Continuous Flow Reactor. *Crystal Growth & Design*, 21(11), 6529–6536. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.1c00968>
- Behera, J., Pal, A., Sahoo, R., & Das, M. C. (2024). Variation in Catalytic Efficacies of a 2D pH-Stable MOF by Altering Activation Methods. *Chemistry (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 30(34), e202400375. <https://doi.org/10.1002/chem.202400375>
- Cai, K., Chen, W., Wan, Y., Chu, H., Hai, X., & Zou, R. (2024). Self-Reconstructed Metal-Organic Framework-Based Hybrid Electrocatalysts for Efficient Oxygen Evolution. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 14. <https://doi.org/10.3390/nano14141168>
- Carpenter, B. P., Talosig, A. R., Rose, B., Di Palma, G., & Patterson, J. P. (2023). Understanding and controlling the nucleation and growth of metal-organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 52(20), 6918–6937. <https://doi.org/10.1039/d3cs00312d>
- Chen, M., Huang, Y., Wang, Y., Pang, Y., Lou, H., Li, Z., Yang, D., & Qiu, X. (2024). Facile Construction of Stable Hierarchical Porous Metal–Organic Frameworks for In Situ Immobilization of β -Glucosidase Based on Competitive Coordination and Selective Etching Strategies. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(17), 6728–6737. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c00853>
- Chen, S., Zhang, Z., Chen, W., Lucier, B. E. G., Chen, M., Zhang, W., Zhu, H., Hung, I., Zheng, A., Gan, Z., Lei, D., & Huang, Y. (2024). Understanding water reaction

- pathways to control the hydrolytic reactivity of a Zn metal-organic framework. *Nature Communications*, 15(1), 10776. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54493-7>
- Choi, S., Jeong, K., Park, J. Y., & Lee, Y. S. (2015). Computational Study of Hydrogen Chemisorption on a Multi-Phenyl Organic Linker as a Model of Hydrogen Spillover on Metal-Organic Frameworks#. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 36. <https://doi.org/10.1002/bkcs.10142>
- Cirujano, F. G., & Llabrés I Xamena, F. X. (2020). Tuning the Catalytic Properties of UiO-66 Metal-Organic Frameworks: From Lewis to Defect-Induced Brønsted Acidity. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 11(12), 4879–4890. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c00984>
- Dai, S., Tissot, A., & Serre, C. (2021). Metal-Organic Frameworks: From Ambient Green Synthesis to Applications. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 94(11), 2623–2636. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20210276>
- D'Amato, R., Bondi, R., Moghdad, I., Marmottini, F., Mcpherson, M. J., Naili, H., Taddei, M., & Costantino, F. (2021). "Shake 'n Bake" Route to Functionalized Zr-UiO-66 Metal-Organic Frameworks. *Inorganic Chemistry*, 60(18), 14294–14301. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c01839>
- Dhakshinamoorthy, A., Garcia, H., & Asiri, A. M. (2020). Catalysis in Confined Spaces of Metal Organic Frameworks. *ChemCatChem*, 12. <https://doi.org/10.1002/cctc.202001188>

- Ding, C.-W., Luo, W., Zhou, J.-Y., Ma, X.-J., Chen, G.-H., Zhou, X.-P., & Li, D. (2019). Hydroxo Iron (III) Sites in a Metal-Organic Framework: Proton-Coupled Electron Transfer and Catalytic Oxidation of Alcohol with Molecular Oxygen. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(49), 45621–45628. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b15311>
- Doustkhah, E., Hassandoost, R., Khataee, A., Luque, R., & Assadi, M. H. N. (2021). Hard-templated metal-organic frameworks for advanced applications. *Chemical Society Reviews*, 50(5), 2927–2953. <https://doi.org/10.1039/c9cs00813f>
- Duan, C., Liang, K., Lin, J., Li, J., Li, L., Kang, L., Yu, Y., & Xi, H. (2021). Application of hierarchically porous metal-organic frameworks in heterogeneous catalysis: A review. *Science China Materials*, 65(2), 298–320. <https://doi.org/10.1007/s40843-021-1910-2>
- Duan, C., Yu, Y., Xiao, J., Zhang, X., Li, L., Yang, P., Wu, J., & Xi, H. (2020). Water-based routes for synthesis of metal-organic frameworks: A review. *Science China Materials*, 63(5), 667–685. <https://doi.org/10.1007/s40843-019-1264-x>
- Duarte, M. P., Diniz, C. V., Bicalho, H. A., Naccache, R., & Howarth, A. J. (2025). A Zirconium-Based Metal–Organic Framework as an Effective Green Catalyst for the Synthesis of Biodiesel. *Inorganic Chemistry*, 64(17), 8701–8710. <https://doi.org/10.1021/ACS.INORGCHEM.5C00618>