

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 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

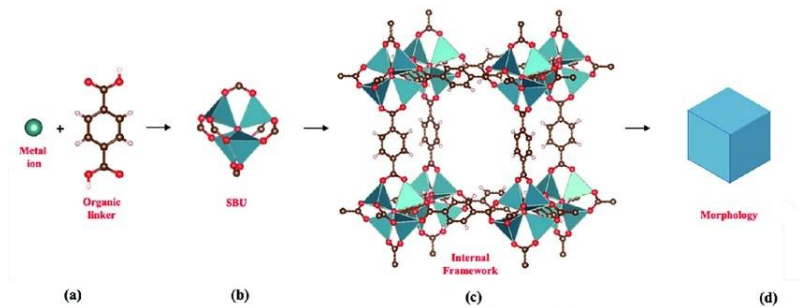
disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan reaksi tertentu (Gao *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024). Karakteristik unik ini memungkinkan integrasi antara situs aktif katalitik dan saluran pori yang terkontrol, sehingga meningkatkan difusi molekul reaktan dan efisiensi reaksi (Kong *et al.*, 2024; Xie *et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

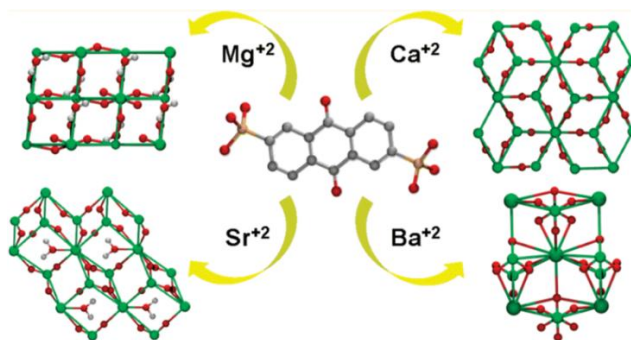
2. MOF Berbasis Logam p-Blok

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)

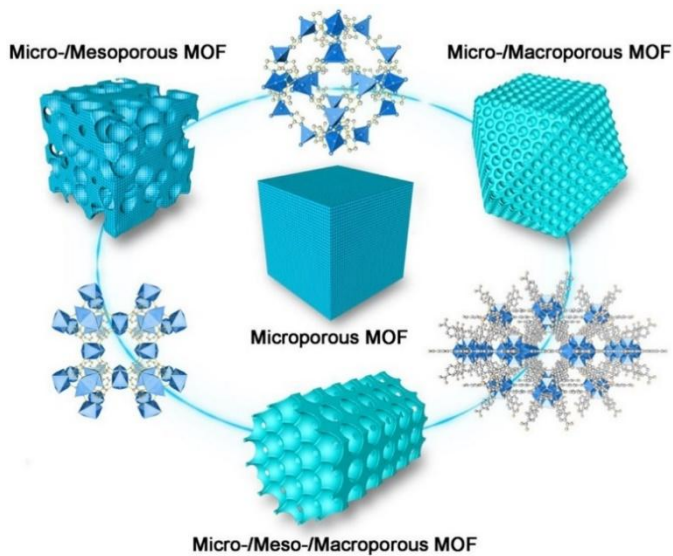
4. MOF Terfungsionalisasi Linker Organik

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 –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>

- Dutta, S., Walden, M., Sinelshchikova, A., Ettlinger, R., Lizundia, E., & Wuttke, S. (2024). Cradle-to-Gate Environmental Impact Assessment of Commercially Available Metal-Organic Frameworks Manufacturing. *Advanced Functional Materials*, 34(52). <https://doi.org/10.1002/adfm.202410751>
- Farwa, U., Sandhu, Z. A., Kiran, A., Raza, M. A., Ashraf, S., Gulzarab, H., Fiaz, M., Malik, A., & Al-Sehemi, A. G. (2024). Revolutionizing environmental cleanup: the evolution of MOFs as catalysts for pollution remediation. *RSC Advances*, 14. <https://doi.org/10.1039/d4ra05642f>
- Ferreira, C. E. S., Balula, S. S., & Cunha-Silva, L. (2024). Recent Advances in Catalytic Compounds Developed by Thermal Treatment of (Zr-Based) Metal–Organic Frameworks. *Compounds*, 4. <https://doi.org/10.3390/compounds4020017>
- Gadzikwa, T., & Matseketsa, P. (2024). The post-synthesis modification (PSM) of MOFs for catalysis. *Dalton Transactions*, 53(18), 7659–7668. <https://doi.org/10.1039/d4dt00514g>
- Gómez-Oliveira, E. P., Reinares-Fisac, D., Aguirre-Díaz, L. M., Esteban-Betegón, F., Pintado-Sierra, M., Gutiérrez-Puebla, E., Iglesias, M., Ángeles Monge, M., & Gándara, F. (2022). Framework Adaptability and Concerted Structural Response in a Bismuth Metal-Organic Framework Catalyst. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 61(37), e202209335. <https://doi.org/10.1002/anie.202209335>

- Griffin, S. L. D., Briuglia, M. L. D., Ter Horst, J. H. P., & Forgan, R. S. P. (2020). Assessing Crystallisation Kinetics of Zr Metal–Organic Frameworks through Turbidity Measurements to Inform Rapid Microwave-Assisted Synthesis. *Chemistry (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 26(30), 6910–6918. <https://doi.org/10.1002/chem.202000993>.
- Han, G.-Y., Sun, M., Zhao, R., Junaid, Q. M., Hou, G., Mohmand, N. Z. K., Jia, C., Liu, Y., Van Der Voort, P., Shi, L., & Feng, X. (2025). Defect engineered Ti-MOFs and their applications. *Chemical Society Reviews*, 54. <https://doi.org/10.1039/d4cs01007h>
- Han, J., Jeong, N., Thallapally, P. K., Lee, M. S., & Kim, M. (2019). Identification of Reaction Sites on Metal–Organic Framework-Based Asymmetric Catalysts for Carbonyl–Ene Reactions. *ACS Catalysis*, 9. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b04827>
- Han, W., Shi, M., & Jiang, H.-L. (2025). Scalable and Low-Energy Synthesis of Metal–Organic Frameworks by a Seed-Mediated Approach. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 64(13), e202421942. <https://doi.org/10.1002/anie.202421942>
- He, T., Kong, X.-J., & Li, J.-R. (2021). Chemically Stable Metal–Organic Frameworks: Rational Construction and Application Expansion. *Accounts of Chemical Research*, 54(15), 3083–3094. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00280>
- Hong, S.-J., Zhang, X.-N., Sun, Z., & Zeng, T. (2024). The potential health risks of N,N-dimethylformamide: An updated review. *Journal of Applied Toxicology: JAT*, 44(11), 1637–1646. <https://doi.org/10.1002/jat.4590>

- Hu, J., Liu, J., Liu, Y., & Gu, C. (2018). Computational Screening of Alkali, Alkaline Earth, and Transition Metals Alkoxide-Functionalized Metal–Organic Frameworks for CO₂ Capture. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b05334>
- Iram, G., Ateeq-Ur-Rehman, A.-U.-R., Iqbal, M. A., Zafar, A., Majeed, A., Hayat, S., & Nawaz, M. (2024). Advanced synthetic routes of metal organic frameworks and their diverse applications. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 44(4), 449–470. <https://doi.org/10.1515/revic-2023-0024>
- Jannetto, P. J., & Cowl, C. T. (2023). Elementary Overview of Heavy Metals. *Clinical Chemistry*, 69(4), 336–349. <https://doi.org/10.1093/clinchem/hvad022>
- John, C., Sunajadevi, K. R. P., Pinheiro, D., & Vishwanath, R. S. (2025). MXene@MOF Composites: Converging Synthesis Strategies, Structural Features, and Emerging Applications. *Chemistry (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, e02884. <https://doi.org/10.1002/chem.202502884>
- Joshi, J. N., Zhu, G., Walton, K. S., Lee, J. J., Jones, C. W., Carter, E. A., & Lively, R. P. (2018). Probing Metal–Organic Framework Design for Adsorptive Natural Gas Purification. *Langmuir*, 34. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00889>
- Jurić, M., Golub, N., Galić, E., Radić, K., Maslov Bandić, L., & Vitali Čepo, D. (2025). Microwave-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Mandarin Peel: A Comprehensive Biorefinery Strategy.

- Antioxidants*, 14(6), 722.
<https://doi.org/10.3390/ANTIOX14060722/S1>
- Kabtamu, D. M., Wu, Y.-N., & Li, F. (2020). Hierarchically porous metal–organic frameworks: Synthesis strategies, structure(s), and emerging applications in decontamination. *Journal of Hazardous Materials*, 397, Article 122765.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122765>
- Kochetygov, I., Maggiulli, L., Ranocchiari, M., & Ferri, D. (2024). The Mechanism of Rapid and Green Metal–Organic Framework Synthesis by *In Situ* Spectroscopy and Diffraction. *Chemistry of Materials*, 36(14), 6877–6887.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c00879>
- Lee, H. K., Lee, J. H., & Moon, H. R. (2021). Mechanochemistry as a Reconstruction Tool of Decomposed Metal-Organic Frameworks. *Inorganic Chemistry*, 60(16), 11825–11829.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00610>
- Lee, S., Xie, H., Chen, Z., Mian, M. R., Gómez-Torres, A., Syed, Z. H., Reischauer, S., Chapman, K. W., Delferro, M., & Farha, O. K. (2024). Metal-Organic Frameworks as a Tunable Platform to Deconvolute Stereoelectronic Effects on the Catalytic Activity of Thioanisole Oxidation. *Journal of the American Chemical Society*, 146(6), 3955–3962.
<https://doi.org/10.1021/jacs.3c11809>
- Leroy, M. A., Perera, A. S., Lamichhane, S., Mapile, A. N., Khaliq, F., Kadota, K., Li, G., & Han, Y. (2022). Two-in-One MOF Structure with Tunable Porosity for Enhanced Separation. *ACS Central Science*, 8(2),

150–152.

<https://doi.org/10.1021/acscentsci.2c00099>

Li, J., Meng, Y.-X., Li, L., Zhang, L.-L., Huang, J.-Y., & Jiang, H.-L. (2023). Zr- and Ti-based metal-organic frameworks: synthesis, structures and catalytic applications. *Chemical Communications*, 59. <https://doi.org/10.1039/d2cc06948b>

Li, K., Yang, J., Li, C., & Gu, J. (2023). Trimodal Hierarchical Porous Metal–Organic Frameworks with Tunable Mesoporous Core–Shell Architectures. In *ACS Materials Letters* (Vol. 6, Issue 1, pp. 233–239). <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.3c01236>

Li, S., Zhou, X., Yu, L., Mao, S., Gao, M., Li, J., & Wang, H. (2025). An Aluminum-Based Metal–Organic Framework Incorporating Al₃ and Al₉ Nodes with High Porosity. *ACS Materials Letters*, 7(7), 2390–2396.

<https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.5c00610>

Lim, J., Jeong, S., Lee, S., Baek, S. Bin, Seong, J., Ha, H., Kim, M., & Lah, M. S. (2021). Amine-Tagged Fragmented Ligand Installation for Covalent Modification of MOF-74. *Angewandte Chemie*, 133. <https://doi.org/10.1002/ange.202100456>

Lin, H., Xu, Y., Wang, B., Li, D.-S., Zhou, T., & Zhang, J. (2022). Postsynthetic Modification of Metal–Organic Frameworks for Photocatalytic Applications. *Small Structures*, 3(5), 2270018. <https://doi.org/10.1002/sstr.202270018>

Lin, R., Yao, Y., Zulkifli, M. Y. B., Li, X., Gao, S., Huang, W., Smart, S., Lyu, M., Wang, L., Chen, V., & Hou, J. (2022).

- Binder-free mechanochemical metal-organic framework nanocrystal coatings. *Nanoscale*, 14(6), 2221–2229. <https://doi.org/10.1039/d1nr08377e>
- Limtrakul, J. (2021). Density Functional Investigation of the Conversion of Furfural to Furfuryl Alcohol by Reaction with i-Propanol over UiO-66 Metal-Organic Framework. *Inorganic Chemistry*, 60(7), 4860–4868. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c03764>
- Liu, P., Wang, R., & Yu, F. (2025). Highly Efficient Solvent-Free Cyanosilylation of Aldehydes Catalyzed by Bilayered Two-Dimensional Metal-Organic Frameworks. *Chemistry (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 31(27), e202500741. <https://doi.org/10.1002/chem.202500741>
- Ma, M., Lu, L., Li, H., Xiong, Y., & Dong, F. (2019). Functional Metal Organic Framework/SiO₂ Nanocomposites: From Versatile Synthesis to Advanced Applications. *Polymers*, 11(11), 1823. <https://doi.org/10.3390/polym11111823>
- Maddigan, N. K., Linder-Patton, O. M., Falcaro, P., Sumbly, C. J., Bell, S. G., & Doonan, C. J. (2021). Influence of the Synthesis and Storage Conditions on the Activity of Candida antarctica Lipase B ZIF-8 Biocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(44), 51867–51875. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04785>

- Mandal, S., Natarajan, S., Mani, P., & Pankajakshan, A. (2020). Post-Synthetic Modification of Metal–Organic Frameworks Toward Applications. *Advanced Functional Materials*, 31(4), 2006291. <https://doi.org/10.1002/adfm.202006291>
- Marino, P., Donnarumma, P. R., Bicalho, H. A., Quezada-Nova, V., Titi, H. M., & Howarth, A. J. (2021). A Step toward Change: A Green Alternative for the Synthesis of Metal–Organic Frameworks. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(48), 16356–16362. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c06032>
- Matlinska, M. A., Michaelis, V. K., Katz, M. J., Iyer, A. K., Lawrence, M. C., Mar, A., Oliynyk, A. O., Hughton, B., Bernard, G. M., Ha, M., & Lambkin, G. (2019). Alkaline Earth Metal–Organic Frameworks with Tailorable Ion Release: A Path for Supporting Biomineralization. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11004>
- Mehmood, R., Gilani, E. H., Ahmed, M., Feroz, M., & Saeed, M. T. (2025). Synthesis and Characterization of Highly Crystalline Strontium Metal-Organic Frameworks using 1,4-Benzenedicarboxylic Acid (BDC) Organic Linker. *Scientific Inquiry and Review*, 9. <https://doi.org/10.32350/sir.91.01>
- Mendes, R. F., Almeida Paz, F. A., Firmino, A. D. G., & Tomé, J. P. C. (2018). Metal-organic framework assembled from erbium and a tetrapodal

- polyphosphonic acid organic linker. *Acta Crystallographica Section C Structural Chemistry*, 74. <https://doi.org/10.1107/s2053229618007374>
- Mittal, A., Roy, I., & Gandhi, S. (2022). Drug delivery applications of metal-organic frameworks (MOFs). In L. J. Villarreal-Gómez (Ed.), *Drug carriers*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103684>
- Nadeem, T. B., Imran, M., & Tandis, E. (2025). Applications of MOF-Based Nanocomposites in Heat Exchangers: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 15(3), 205. <https://doi.org/10.3390/nano15030205>
- Obeso, J. L., Flores, C. V., Gutiérrez, A. G., Leyva, C., Valdivia-Corona, J. C., Herrera-Zúñiga, L. D., De Los Reyes, J. A., Peralta, R. A., & Ibarra, I. A. (2025). Low-toxicity metal-organic frameworks: Sustainable solutions for versatile applications. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 46(3), 265–280. <https://doi.org/10.1002/bkcs.70005>
- Pal, T. K. (2022). *Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Heterogeneous Catalysis* (pp. 141–153). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_11
- Pitt, T. A., Bain, D. C., Del Campo, M., Musser, A. J., & Milner, P. J. (2025). Controlled Growth and Interconversion of Photoluminescent Metal-Organic Frameworks Under High-Concentration Conditions. *Chemistry of Materials: A Publication of the American*

- Chemical Society*, 37(8), 2964–2975.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5c00355>
- Pizzanelli, S., Gordeeva, L. G., Freni, A., Forte, C., Solovyeva, M. V, & Monti, S. (2020). A close view of the organic linker in a MOF: structural insights from a combined ¹H NMR relaxometry and computational investigation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22. <https://doi.org/10.1039/d0cp01863e>
- Priyadarshini, P., Mishra, A., Nayak, S., & Parida, K. (2025). NH₂-MIL-125(Ti) and its functional nanomaterials - a versatile platform in the photocatalytic arena. *Nanoscale*, 17(9), 4906–4957.
<https://doi.org/10.1039/d4nr03774j>
- Qiao, C., Jia, W., Zhong, Q., Liu, B., Zhang, Y., Meng, C., & Tian, F. (2020). MOF-Derived Cu-Nanoparticle Embedded in Porous Carbon for the Efficient Hydrogenation of Nitroaromatic Compounds. *Catalysis Letters*, 150(12), 3394–3401.
<https://doi.org/10.1007/s10562-020-03244-6>
- Qiao, Y., Ni, Y., Kong, F., Li, R., Zhang, C., Kong, A., & Shan, Y. (2019). Pyrolytic Carbon-coated Cu-Fe Alloy Nanoparticles with High Catalytic Performance for Oxygen Electoreduction. *Chemistry – An Asian Journal*, 14(15), 2676–2684.
<https://doi.org/10.1002/asia.201900524>
- Rastin, H., Dell’Angelo, D., Sayede, A., Badawi, M., & Habibzadeh, S. (2025). Green and sustainable metal-organic frameworks (MOFs) in wastewater treatment:

- A review. *Environmental Research*, 282, 122087.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122087>
- Ren, S., Wang, F., Gao, H., Han, X., Zhang, T., Yuan, Y., & Zhou, Z. (2023). Recent Progress and Future Prospects of Laccase Immobilization on MOF Supports for Industrial Applications. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(3), 1669–1684.
<https://doi.org/10.1007/s12010-023-04607-6>
- Sailaja, B. B. V., Sridevi, V., Voosala, C., Sirisha, D., Talib Hamzah, H., & Adnan Abdullah, T. (2024). *METAL-ORGANIC FRAMEWORKS (MOFS): FUNDAMENTAL, PROPERTIES, AND APPLICATIONS* (pp. 110–134). Iterative International Publishers Selfypage Developers Pvt Ltd.
<https://doi.org/10.58532/v3becs17p3ch5>
- Samanidou, V. F., & Deliyanni, E. A. (2020). Metal Organic Frameworks: Synthesis and Application. *Molecules*, 25(4), 960.
<https://doi.org/10.3390/molecules25040960>
- Seth, S., Moorthy, J. N., & Savitha, G. (2015). Carbon Dioxide Capture by a Metal-Organic Framework with Nitrogen-Rich Channels Based on Rationally Designed Triazole-Functionalized Tetraacid Organic Linker. *Inorganic Chemistry*, 54.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b00722>
- Shultz, A. M., Nguyen, S. T., Hupp, J. T., Sarjeant, A. A., & Farha, O. K. (2011). Post-Synthesis Modification of a Metal–Organic Framework To Form Metallosalen-

- Containing MOF Materials. *Journal of the American Chemical Society*, 133. <https://doi.org/10.1021/ja204820d>
- Singh, P., Panwar, S., & Dave, P. N. (2025). Advancing Environmental Remediation with Metal–Organic Frameworks: Perspectives on Green Synthesis, Scale-Up Strategies, Techno-Economic Analysis, and Life Cycle Assessment. *Advanced Materials Technologies*, 17(3). <https://doi.org/10.1002/admt.202501309>
- Sittiwong, J., Boonmark, S., Nunthakitgoson, W., Maihom, T., Wattanakit, C., & Solé-Daura, A., Robinson, A. L., Dolbecq, A., Mellot-Draznieks, C., Romdhane, F. Ben, Penas-Hidalgo, F., Chen, H., Brubach, J.-B., Fontecave, M., Frégnaux, M., Tran, N.-H., & Mialane, P. (2024). Zr-Based MOF-545 Metal-Organic Framework Loaded with Highly Dispersed Small Size Ni Nanoparticles for CO₂ Methanation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c18154>
- Song, Y. (2021). Development of Multifunctional Metal–Organic Frameworks for Catalytic Applications. *Knowledge@UChicago (University of Chicago)*. <https://doi.org/10.6082/uchicago.3368>
- Sun, D., & Li, Z. (2017). Robust Ti- and Zr-Based Metal–Organic Frameworks for Photocatalysis. *Chinese Journal of Chemistry*, 35(2), 135–147. <https://doi.org/10.1002/cjoc.201600647>

- Sun, J.-L., Li, J.-H., Chen, Y.-Z., Ge, B.-D., & Wang, G.-M. (2018). Three-Shell Cu@Co@Ni Nanoparticles Stabilized with a Metal-Organic Framework for Enhanced Tandem Catalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b18584>
- Tan, C., He, J., Zhou, F., Xu, R., Gao, Y., Marks, R. S., & Li, J. (2025). CTAB-Assisted Formation of Hierarchical Porosity in Cu-BDC-NH₂ Metal–Organic Frameworks and Its Enhanced Peroxidase-like Catalysis for Xanthine Sensing. *Processes*, 13(2), 387. <https://doi.org/10.3390/pr13020387>
- Terrón, D., Sanromán, A., & Pazos, M. (2025). Metal–Organic Frameworks: Next-Generation Materials for Environmental Remediation. *Catalysts*, 15. <https://doi.org/10.3390/catal15030244>
- Thacker, N. C., Ji, P., Lin, Z., Urban, A., & Lin, W. (2017). Phenanthroline-based metal-organic frameworks for Fe-catalyzed Csp³-H amination. *Faraday Discussions*, 201. <https://doi.org/10.1039/c7fd00030h>
- Tong, P., Liang, J., Jiang, X., & Li, J. (2019). Research Progress on Metal-Organic Framework Composites in Chemical Sensors. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 50(4), 376–392. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1642732>
- Vaid, T. P., Kelley, S. P., & Rogers, R. D. (2017). Structure-directing effects of ionic liquids in the ionothermal synthesis of metal-organic frameworks. *IUCr*, 4(Pt 4),

380–392.

<https://doi.org/10.1107/s2052252517008326>

Wang, H.-P., Liu, J.-C., Zhang, G., Su, J., Meng, Y.-R., & Li, S.-F. (2024). Square-planar Tetranuclear Cluster-based Alkaline Earth Metal-organic Frameworks with Enhanced Proton Conductivity. *Chemistry – An Asian Journal*, 19. <https://doi.org/10.1002/asia.202400175>

Wang, S., Li, S., Feng, H., Yang, W., & Feng, Y.-S. (2023). Visible-Light-Driven Porphyrin-Based Bimetallic Metal–Organic Frameworks for Selective Photoreduction of Nitro Compounds under Mild Conditions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(3), 4845–4856. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c22686>

Wegner, K., Barnes, D., Manzor, K., Jardine, A., & Moran, D. (2021). Evaluation of greener solvents for solid-phase peptide synthesis. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 14(1), 153–164. <https://doi.org/10.1080/17518253.2021.1877363>

Weng, Y., Chen, R., Hui, Y., Chen, D., & Zhao, C.-X. (2024). Boosting Enzyme Activity in Enzyme Metal–Organic Framework Composites. *Chem & Bio Engineering*, 1(2), 99–112. <https://doi.org/10.1021/cbe.3c00091>

Wu, C., & Zhao, M. (2017). Incorporation of Molecular Catalysts in Metal–Organic Frameworks for Highly Efficient Heterogeneous Catalysis. *Advanced*

- Materials*, 29(14), 1605446.
<https://doi.org/10.1002/adma.201605446>
- Wu, Z., Niu, F., Yao, W., Gao, S., Chen, D., & Huang, Y. (2024). Photocatalytic Selective Oxidation of Toluene over Chlorine-Coordinated MIL-101(Fe) under Ambient Conditions. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 40(40), 20841–20847.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02431>
- Xiao, J.-D., Li, D., & Jiang, H.-L. (2018). Metal-organic frameworks for photocatalysis. *SCIENTIA SINICA Chimica*, 48(9), 1058–1075.
<https://doi.org/10.1360/n032018-00035>
- Xie, Z., & Hou, J. (2025). Industrialising Metal–Organic Frameworks—Bridging Laboratory Innovation and Future Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(16), 7941–7955.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c00579>
- Xu, Z., Zhao, Y.-Y., Chen, L., Zhu, C.-Y., Li, P., Gao, W., Li, J.-Y., & Zhang, X.-M. (2023). Thermally activated bipyridyl-based Mn-MOFs with Lewis acid-base bifunctional sites for highly efficient catalytic cycloaddition of CO₂ with epoxides and Knoevenagel condensation reactions. *Dalton Transactions*, 52(12), 3671–3681. <https://doi.org/10.1039/d3dt00043e>
- Yadav, A., & Kanoo, P. (2019). Metal-Organic Frameworks as Platform for Lewis-Acid-Catalyzed Organic Transformations. *Chemistry – An Asian Journal*, 14.
<https://doi.org/10.1002/asia.201900876>

- Yamada, Y. M. A., Baek, H., Sato, T., Nakao, A., & Uozumi, Y. (2020). Metallically gradated silicon nanowire and palladium nanoparticle composites as robust hydrogenation catalysts. *Communications Chemistry*, 3(1), 81. <https://doi.org/10.1038/s42004-020-0332-z>
- Yang, M., Zhu, R., Chen, X., Tan, J., Yang, C., & Meng, Z. (2025). Structure and Electrical Transport Properties of Metal Cate-Cholate Frameworks: The Metal Center Matters [†]. *Chinese Journal of Chemistry*, 44(3), 311–318. <https://doi.org/10.1002/cjoc.70362>
- Yang, P., Mao, F., Li, Y., Zhuang, Q., & Gu, J. (2018). Hierarchical Porous Zr-Based MOFs Synthesized by a Facile Monocarboxylic Acid Etching Strategy. *Chemistry – A European Journal*, 24(12), 2962–2970. <https://doi.org/10.1002/chem.201705020>
- Ye, G., Liu, D., Kumar, A., Peng, X., Lin, J., Liu, J., & Chen, C. (2021). Alkali /alkaline earth-based metal-organic frameworks for biomedical applications. *Dalton Transactions*, 50. <https://doi.org/10.1039/d1dt02814f>
- Ye, N., Kou, X., Shen, J., Huang, S., Chen, G., & Ouyang, G. (2020). Metal-Organic Frameworks: A New Platform for Enzyme Immobilization. *ChemBioChem*, 21(18), 2585–2590. <https://doi.org/10.1002/cbic.202000095>
- Yi, J., Lee, G., & Park, S. S. (2024). Solvent-Induced Structural Rearrangement in Ultrasound-Assisted Synthesis of Metal-Organic Frameworks. *Small Methods*, 8(12), e2400363. <https://doi.org/10.1002/smt.202400363>

- Yoskamtorn, T., Zhao, P., Wu, X.-P., Purchase, K., Orlandi, F., Manuel, P., Taylor, J., Li, Y., Day, S., Ye, L., Tang, C. C., Zhao, Y., & Tsang, S. C. E. (2021). Responses of Defect-Rich Zr-Based Metal-Organic Frameworks toward NH₃ Adsorption. *Journal of the American Chemical Society*, 143(8), 3205–3218. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c12483>
- Yu, H., Xu, C., Li, Y., Jin, F., Ye, F., & Li, X. (2020). Performance Enhancement of CuO/ZnO by Deposition on the Metal-Organic Framework of Cu-BTC for Methanol Steam Reforming Reaction. *ES Energy & Environment*, 8(5). <https://doi.org/10.30919/esee8c415>
- Yu, S., Feng, Y., Hu, J., Zhang, Y., Zhang, C., & Zi, Y. (2025). Stability regulation of metal–organic framework materials for electrocatalysis. *Journal of Materials Chemistry A*, 13. <https://doi.org/10.1039/d4ta08090d>
- Zhang, G., & Fei, H. (2019). Synthesis and applications of porous organosulfonate-based metal–organic frameworks. *Topics in Current Chemistry*, 377, Article 27. <https://doi.org/10.1007/s41061-019-0259-y>
- Zhang, K., Qiao, Z., & Jiang, J. (2016). Molecular Design of Zirconium Tetrazolate Metal–Organic Frameworks for CO₂ Capture. *Crystal Growth & Design*, 17. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b01405>
- Zhang, L., Sun, D., Xin, X., & Kang, Z. (2016). Metal–organic frameworks based luminescent materials for

- nitroaromatics sensing. *CrystEngComm*, 18, <https://doi.org/10.1039/c5ce01917f>
- Zhang, Y., Huang, C., & Mi, L. (2020). Metal-organic frameworks as acid- and/or base-functionalized catalysts for tandem reactions. *Dalton Transactions*, 49(42), 14723–14730. <https://doi.org/10.1039/d0dt03025b>
- Zhang, X., Ha, S., Fisher, R., Wu, D., Risko, C., & Brozek, C. K. (2024). Colloidal Stability and Solubility of Metal–Organic Framework Particles. *Chemistry of Materials*, 36(8), 3673–3682. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c03191>
- Zhao, T., Peng, S., Yu, J., Chen, J., Luo, F., Xiao, P., Nie, S., & Chen, Y. (2025). Advances in Green Synthesis and Photo-/Electrocatalytic Applications of Zirconium-Based MOFs: A Review. *Organics*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.3390/org6020022>
- Zhao, X., Yin, F., Liu, N., Li, G., Fan, T., & Chen, B. (2017). Highly efficient metal–organic-framework catalysts for electrochemical synthesis of ammonia from N₂ (air) and water at low temperature and ambient pressure. *Journal of Materials Science*, 52(17), 10175–10185. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1176-5>
- Zhao, Y., Zhao, Y., Wang, J., & Wang, Z. (2025). Artificial Intelligence Meets Laboratory Automation in Discovery and Synthesis of Metal–Organic Frameworks: A Review. *Industrial & Engineering*

- Chemistry Research*, 64(9), 4637–4668.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04636>
- Zhong, Y., Mao, Y., Shi, S., Wan, M., Ma, C., Wang, S., Chen, C., Zhao, D., & Zhang, N. (2019). Fabrication of Magnetic Pd/MOF Hollow Nanospheres with Double-Shell Structure: Toward Highly Efficient and Recyclable Nanocatalysts for Hydrogenation Reaction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(35), 32251–32260.
<https://doi.org/10.1021/acsami.9b07864>
- Zhong, Z., Pang, S., Wu, Y., Jiang, S., & Ouyang, J. (2017). Synthesis and characterization of mesoporous Cu-MOF for laccase immobilization. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(7), 1841–1847.
<https://doi.org/10.1002/jctb.5189>
- Zorainy, M. Y., Sheashea, M., Kaliaguine, S., Gobara, M., & Boffito, D. C. (2022). Facile solvothermal synthesis of a MIL-47(V) metal-organic framework for a high-performance Epoxy/MOF coating with improved anticorrosion properties. *RSC Advances*, 12(15), 9008–9022. <https://doi.org/10.1039/d1ra08950a>

BAB 2

KIMIA BIOELEKTROKIMIA: POTENSI DALAM BIOREAKTOR DAN PRODUKSI ENERGI BERBASIS MIKROBA

Oleh: Ummi Zahra

A. Pendahuluan

Krisis energi global dan meningkatnya kebutuhan akan sumber energi terbarukan mendorong berkembangnya bioteknologi energi yang memanfaatkan kemampuan biologis mikroorganisme dalam mengonversi biomassa dan limbah organik menjadi energi. Selama ini, bioreaktor konvensional telah digunakan untuk mengoptimalkan proses biologis seperti fermentasi dan pencernaan anaerob dalam produksi bioetanol dan biogas, karena sistem ini mampu menyediakan lingkungan terkendali yang mendukung aktivitas metabolik mikroorganisme secara stabil dan efisien. Namun, keterbatasan efisiensi konversi energi kimia menjadi energi yang dapat langsung dimanfaatkan mendorong pengembangan pendekatan baru, salah satunya melalui sistem bioelektrokimia yang mengintegrasikan proses biologis dan elektrokimia dalam satu sistem terkontrol (Doran, 2013; Logan *et al.*, 2006).

Dalam sistem bioelektrokimia, seperti *Microbial Fuel Cells* (MFC) dan *Microbial Electrolysis Cells* (MEC), mikroorganisme tidak hanya berperan sebagai agen biodegradasi substrat organik, tetapi juga sebagai katalis biologis yang mampu mentransfer elektron hasil metabolisme ke elektroda. Proses ini memungkinkan konversi langsung energi kimia dalam bahan organik menjadi energi listrik atau energi kimia lain seperti hidrogen, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dibandingkan sistem bioreaktor konvensional. Oleh karena itu, keberadaan bioreaktor dalam sistem bioelektrokimia menjadi sangat krusial untuk menjaga kondisi lingkungan seperti pH, suhu, ketersediaan nutrisi, dan kondisi redoks agar transfer elektron mikroba dapat berlangsung optimal (Logan *et al.*, 2006; Rabaey & Verstraete, 2005).

Peran utama bioreaktor dalam sistem bioelektrokimia juga terlihat pada kemampuannya dalam mengoptimalkan interaksi antara mikroorganisme dan elektroda, yang merupakan inti dari mekanisme pembangkitan energi. Desain bioreaktor bioelektrokimia memungkinkan peningkatan luas permukaan elektroda, kontrol hidrodinamika, serta pengurangan hambatan internal sistem, sehingga meningkatkan laju transfer massa dan transfer elektron. Tanpa sistem bioreaktor yang dirancang secara khusus, mikroorganisme elektrogenik seperti *Geobacter* dan *Shewanella* tidak

dapat mempertahankan aktivitas respirasi ekstraseluler yang stabil, yang pada akhirnya menurunkan kinerja sistem pembangkit energi terbarukan tersebut (Lovley, 2006; Logan, 2009).

Keterkaitan antara bioreaktor dan sistem bioelektrokimia semakin jelas ketika dibandingkan dengan penggunaan wadah sederhana tanpa kontrol operasional yang memadai. Wadah terbuka atau sistem statis tidak mampu menjaga gradien elektrokimia, kestabilan biofilm mikroba pada elektroda, maupun mencegah kontaminasi mikroorganisme non-elektrogenik yang dapat mengganggu aliran elektron. Akibatnya, sistem sederhana tersebut tidak efektif untuk menghasilkan energi secara konsisten dan berkelanjutan. Oleh karena itu, bioreaktor bioelektrokimia berperan sebagai evolusi dari bioreaktor konvensional, yang tidak hanya mendukung pertumbuhan mikroorganisme, tetapi juga memfasilitasi konversi energi biologis menjadi energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan secara langsung (Rabaey *et al.*, 2007; Pant *et al.*, 2010).

Dengan demikian, pengembangan sistem bioelektrokimia menegaskan bahwa mikroorganisme merupakan komponen kunci dalam teknologi energi terbarukan generasi lanjut, di mana bioreaktor berfungsi sebagai platform integratif yang menggabungkan proses biologis dan elektrokimia secara sinergis. Pendekatan ini tidak hanya memperluas peran mikroorganisme dari

sekadar penghasil metabolit energi menjadi penghasil listrik dan hidrogen, tetapi juga membuka peluang pemanfaatan limbah organik sebagai sumber energi bersih yang berkelanjutan (Logan & Rabaey, 2012).

B. Konsep Dasar Bioreaktor

Bioreaktor merupakan suatu sistem rekayasa yang dirancang untuk menyediakan lingkungan terkontrol bagi berlangsungnya reaksi biologis yang melibatkan mikroorganisme, sel, atau enzim guna menghasilkan produk tertentu secara efisien dan berkelanjutan (Doran, 2013; Shuler *et al.*, 2017). Prinsip kerja bioreaktor didasarkan pada pengendalian parameter operasional seperti suhu, pH, ketersediaan nutrisi, serta kondisi oksidatif atau reduktif agar aktivitas metabolik mikroorganisme berlangsung optimal (Stanbury *et al.*, 2020). Dalam konteks bioteknologi energi, termasuk sistem bioelektrokimia, bioreaktor berperan tidak hanya sebagai wadah pertumbuhan mikroorganisme, tetapi juga sebagai platform integratif yang memungkinkan konversi energi kimia dari substrat organik menjadi energi listrik atau bahan bakar terbarukan secara langsung (Logan & Rabaey, 2012).

Berdasarkan mode operasinya, bioreaktor dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis utama. Bioreaktor batch dioperasikan dengan memasukkan seluruh substrat di awal proses dan dihentikan setelah

reaksi selesai, sehingga umum digunakan pada penelitian skala laboratorium (Doran, 2013). Bioreaktor *fed-batch* memungkinkan penambahan substrat secara bertahap selama proses berlangsung untuk menghindari inhibisi dan meningkatkan produktivitas (Shuler *et al.*, 2017). Sementara itu, bioreaktor kontinu beroperasi dengan aliran masuk dan keluar secara simultan untuk mempertahankan kondisi tunak yang stabil dan efisien pada skala industri (Stanbury *et al.*, 2020). Selain itu, bioreaktor anaerobik banyak digunakan dalam produksi biogas melalui pencernaan anaerob, sedangkan fotobioreaktor dirancang khusus untuk kultivasi mikroalga dengan pengendalian cahaya dan CO₂ yang ketat dalam produksi biofuel (Mata *et al.*, 2010).

Keberhasilan kinerja bioreaktor sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor desain yang mendukung aktivitas biologis di dalamnya. Aerasi berperan penting dalam proses aerob untuk menjamin ketersediaan oksigen terlarut, sementara pada sistem anaerob dan bioelektrokimia aerasi harus dihindari untuk menjaga kondisi reduktif (Shuler *et al.*, 2017). Agitasi diperlukan untuk memastikan homogenitas medium, meningkatkan transfer massa, dan mencegah sedimentasi sel (Doran, 2013). Selain itu, pengendalian suhu dan pH sangat krusial karena berpengaruh langsung terhadap aktivitas enzim dan stabilitas mikroorganisme (Stanbury *et al.*, 2020). Sterilisasi menjadi aspek penting untuk mencegah

kontaminasi, khususnya pada skala laboratorium dan pilot, sedangkan sistem monitoring dan kontrol memungkinkan pengamatan parameter proses secara real time untuk optimasi kinerja bioreaktor (Shuler *et al.*, 2017).

Pengembangan dan penerapan bioreaktor dilakukan secara bertahap mulai dari skala laboratorium, yang bertujuan untuk memahami kinetika pertumbuhan mikroorganisme dan mekanisme reaksi biologis (Doran, 2013). Tahap selanjutnya adalah skala pilot, yang berfungsi untuk mengevaluasi kestabilan proses, perpindahan massa dan panas, serta keandalan sistem kontrol (Shuler *et al.*, 2017). Pada skala industri, bioreaktor dirancang untuk beroperasi secara kontinu dengan volume besar, efisiensi energi tinggi, dan biaya operasional yang ekonomis (Stanbury *et al.*, 2020). Dalam sistem bioelektrokimia, proses *scale-up* menghadapi tantangan tambahan seperti peningkatan resistansi internal, distribusi biofilm pada elektroda, serta kestabilan produksi energi, sehingga desain bioreaktor menjadi faktor penentu keberhasilan penerapan teknologi ini secara komersial (Logan *et al.*, 2006; Logan & Rabaey, 2012).

C. Mikroba Penghasil Energi

Mikroorganisme memiliki peran fundamental dalam bioteknologi energi karena kemampuannya

mengonversi energi kimia yang tersimpan dalam senyawa organik maupun anorganik menjadi bentuk energi yang dapat dimanfaatkan, seperti gas, cairan bahan bakar, maupun listrik (Madigan *et al.*, 2018). Secara biologis, mikroba bertindak sebagai biokatalis hidup yang menjalankan reaksi metabolik kompleks melalui enzim-enzim spesifik yang memungkinkan transformasi substrat menjadi produk energi secara efisien (Nelson & Cox, 2021). Sementara itu, secara kimia proses tersebut melibatkan reaksi oksidasi–reduksi (redoks), di mana terjadi perpindahan elektron dari donor ke akseptor elektron yang menjadi dasar utama dalam transformasi energi pada sistem biologis (Schlegel, 1993). Pemanfaatan mikroorganisme dalam produksi biogas, bioetanol, biohidrogen, dan listrik berbasis bioelektrokimia menjadikannya komponen kunci dalam pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Rittmann & McCarty, 2020).

1. Bakteri Metanogen (*Methanogenic archaea*)

Metanogen merupakan kelompok Archaea anaerob obligat yang hanya dapat hidup pada kondisi tanpa oksigen dan berperan penting pada tahap akhir proses pencernaan anaerob dengan menghasilkan metana (CH_4) sebagai produk akhir metabolisme (Ferry, 2010). Mikroorganisme ini memanfaatkan substrat sederhana seperti asetat,

hidrogen (H_2), dan karbon dioksida (CO_2) sebagai sumber energi dan karbon untuk pertumbuhannya (Thauer *et al.*, 2008). Selain itu, metanogen memiliki fungsi ekologis penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem mikroba anaerob dengan mengonsumsi hidrogen yang dihasilkan oleh mikroorganisme fermentatif, sehingga mencegah akumulasi hidrogen yang dapat menghambat proses degradasi bahan organik oleh mikroba lain (Stams, 1994).

Sisi Kimia

Secara kimia, metanogen menjalankan proses metanogenesis melalui dua jalur utama, yaitu jalur asetoklastik (pemecahan asetat menjadi metana dan karbon dioksida) serta jalur hidrogenotrofik (reduksi karbon dioksida menggunakan hidrogen untuk menghasilkan metana) (Conrad, 2007). Reaksi-reaksi ini melibatkan sistem enzim kompleks dan kofaktor unik seperti koenzim M dan koenzim F420 yang berperan dalam transfer elektron pada kondisi potensial redoks yang sangat rendah (Thauer, 1998). Proses metanogenesis bersifat eksotermik, sehingga menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan oleh sel mikroba sekaligus menghasilkan metana yang stabil dan memiliki nilai kalor tinggi sebagai bahan bakar (Boone *et al.*, 2001).

Pemanfaatan

Metanogen dimanfaatkan secara luas dalam sistem bioreaktor anaerob, seperti digester biogas, untuk mengolah limbah organik dari sektor pertanian, peternakan, industri, dan domestik menjadi biogas (Deublein & Steinhauser, 2011). Biogas yang dihasilkan, yang umumnya terdiri dari metana dan karbon dioksida, dapat digunakan sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik, bahan bakar memasak, maupun pemanas (Appels *et al.*, 2008). Selain itu, pemanfaatan metanogen dalam produksi biogas berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca karena mampu menangkap dan memanfaatkan metana yang sebaliknya akan dilepaskan ke atmosfer (IPCC, 2014).

2. Mikroorganisme Fermentatif Penghasil Bioetanol

Mikroorganisme fermentatif seperti *Saccharomyces cerevisiae* dan *Zymomonas mobilis* berperan penting dalam mengonversi gula sederhana menjadi bioetanol melalui jalur fermentasi alkohol (Walker, 2011). Secara biologis, mikroba ini memanfaatkan glukosa sebagai sumber energi dan karbon melalui proses glikolisis yang menghasilkan piruvat, yang kemudian diubah menjadi etanol sebagai produk

akhir metabolisme (Nelson & Cox, 2021). Selain menghasilkan energi dalam bentuk ATP, proses ini juga memungkinkan mikroorganisme mempertahankan kelangsungan hidupnya pada kondisi anaerob (Madigan *et al.*, 2018). *Saccharomyces cerevisiae* dikenal memiliki toleransi tinggi terhadap etanol, sedangkan *Zymomonas mobilis* memiliki efisiensi konversi gula yang lebih tinggi karena menggunakan jalur Entner-Doudoroff (Rogers *et al.*, 2007).

Sisi Kimia

Secara kimia, fermentasi alkohol merupakan rangkaian reaksi biokimia yang mengonversi glukosa ($C_6H_{12}O_6$) menjadi etanol (C_2H_5OH) dan karbon dioksida (CO_2) melalui dua tahap utama, yaitu dekarboksilasi piruvat menjadi asetaldehida dan reduksi asetaldehida menjadi etanol (Nelson & Cox, 2021). Proses ini melibatkan enzim kunci seperti piruvat dekarboksilase dan alkohol dehidrogenase (Lehninger, 2021). Selain itu, regenerasi NAD^+ dari NADH merupakan aspek penting dalam fermentasi karena menjaga keseimbangan redoks sel sehingga glikolisis dapat terus berlangsung (Madigan *et al.*, 2018). Reaksi ini berlangsung tanpa kehadiran oksigen (anaerob) dan menghasilkan energi dalam jumlah

terbatas, namun cukup untuk mendukung aktivitas sel mikroba (Schlegel, 1993).

Pemanfaatan

Bioetanol hasil fermentasi dimanfaatkan sebagai bahan bakar nabati yang dapat digunakan secara langsung maupun dicampur dengan bensin dalam berbagai rasio, seperti E10 hingga E85 (Balat & Balat, 2009). Penggunaan bioetanol dalam sektor transportasi telah berkembang pesat karena sifatnya yang lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil, terutama dalam mengurangi emisi karbon monoksida dan gas rumah kaca (Demirbas, 2007). Selain itu, bioetanol dapat diproduksi dari berbagai bahan baku biomassa seperti tebu, jagung, dan lignoselulosa, sehingga mendukung diversifikasi sumber energi terbarukan (Naik *et al.*, 2010). Teknologi ini telah diterapkan secara luas di berbagai negara sebagai bagian dari strategi transisi menuju energi berkelanjutan (Balat & Balat, 2009).

3. Mikroorganisme Penghasil Biohidrogen

Peran Biologis

Mikroorganisme anaerob seperti *Clostridium* dan *Enterobacter* memiliki kemampuan menghasilkan hidrogen (H₂) melalui proses fermentasi gelap (*dark fermentation*), yaitu

pemecahan senyawa organik seperti glukosa menjadi asam organik, karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen (H_2) (Das & Veziroğlu, 2008). Secara biologis, produksi hidrogen ini berfungsi sebagai mekanisme untuk melepaskan kelebihan elektron yang dihasilkan selama metabolisme anaerob, sehingga menjaga keseimbangan redoks dalam sel mikroba (Hallenbeck & Benemann, 2002). Selain itu, proses ini memungkinkan mikroorganisme memperoleh energi dalam kondisi tanpa oksigen melalui jalur fermentatif yang relatif sederhana dan cepat (Madigan *et al.*, 2018).

Sisi Kimia

Secara kimia, biohidrogen dihasilkan melalui reaksi reduksi proton (H^+) menjadi gas hidrogen (H_2), yang dikatalisis oleh enzim hidrogenase atau nitrogenase (Hallenbeck, 2009). Elektron yang digunakan dalam proses ini berasal dari oksidasi substrat organik, seperti glukosa, melalui jalur metabolik seperti glikolisis dan fermentasi (Das & Veziroğlu, 2008). Efisiensi produksi hidrogen sangat dipengaruhi oleh jalur metabolisme yang digunakan (misalnya jalur asetat atau butirat) serta oleh akumulasi produk samping seperti asam organik dan alkohol yang dapat menghambat aktivitas enzim dan menurunkan

hasil hidrogen (Levin *et al.*, 2004). Oleh karena itu, pengendalian kondisi reaksi seperti pH, suhu, dan tekanan parsial hidrogen menjadi faktor penting dalam optimasi proses (Hallenbeck, 2009).

Pemanfaatan

Biohidrogen dipandang sebagai salah satu bahan bakar masa depan karena bersifat bersih, tidak menghasilkan emisi karbon saat digunakan, dan memiliki densitas energi tinggi per satuan massa (Turner, 2004). Saat ini, pemanfaatan biohidrogen masih berada pada tahap penelitian dan skala pilot, terutama dalam sistem terintegrasi seperti bioreaktor anaerob, *dark fermentation-photofermentation hybrid systems*, serta sistem bioelektrokimia seperti *microbial electrolysis cells* (MEC) (Logan *et al.*, 2008). Pengembangan teknologi ini diharapkan dapat menjadi solusi energi berkelanjutan sekaligus mendukung pengolahan limbah organik secara efisien (Das & Veziroğlu, 2008).

4. Mikroorganisme Elektrogenik

Mikroorganisme elektrogenik seperti *Geobacter sulfurreducens* dan *Shewanella oneidensis* memiliki kemampuan unik dalam melakukan respirasi ekstraseluler, yaitu mentransfer elektron hasil metabolisme ke akseptor elektron eksternal seperti elektroda

(Logan, 2009). Secara biologis, mikroorganisme ini mampu membentuk biofilm konduktif pada permukaan elektroda, yang memungkinkan transfer elektron berlangsung secara kontinu dan efisien (Lovley, 2006). Selain itu, kemampuan ini memberikan keuntungan ekologis bagi mikroba untuk bertahan hidup pada lingkungan yang kekurangan akseptor elektron terlarut seperti oksigen (Madigan *et al.*, 2018).

Sisi Kimia

Dari sisi kimia, proses yang terjadi dalam sistem bioelektrokimia melibatkan oksidasi substrat organik (seperti asetat atau glukosa) pada anoda yang menghasilkan elektron dan proton (Logan *et al.*, 2008). Elektron kemudian mengalir melalui rangkaian eksternal menuju katoda, sementara proton bergerak melalui medium elektrolit atau membran, sehingga menghasilkan arus listrik (Rabaey & Verstraete, 2005). Mekanisme transfer elektron ini dapat berlangsung melalui berbagai jalur, termasuk melalui protein redoks seperti sitokrom, mediator elektron, atau struktur pili konduktif (nanowires) yang dimiliki oleh beberapa bakteri elektrogenik (Lovley, 2006).

Pemanfaatan

Mikroorganisme elektrogenik dimanfaatkan dalam teknologi *Microbial Fuel Cells* (MFC) untuk menghasilkan listrik secara langsung dari limbah organik, serta dalam *Microbial Electrolysis Cells* (MEC) untuk produksi hidrogen atau senyawa kimia bernilai tambah (Logan *et al.*, 2008). Teknologi ini memiliki potensi besar dalam pengolahan limbah karena mampu mengurangi kandungan bahan organik sekaligus menghasilkan energi (Rabaey & Verstraete, 2005). Selain itu, sistem ini juga dikembangkan untuk aplikasi lain seperti biosensor dan bioremediasi, sehingga menjadi salah satu pendekatan inovatif dalam pengembangan energi terbarukan berkelanjutan (Logan, 2009).

5. Mikroalga dan Sianobakteri

Mikroalga dan sianobakteri merupakan organisme fotosintetik yang mampu mengonversi energi cahaya menjadi energi kimia dalam bentuk biomassa melalui proses fotosintesis (Chisti, 2007). Secara biologis, organisme ini memiliki laju pertumbuhan yang tinggi serta kemampuan efisien dalam menyerap karbon dioksida (CO₂), sehingga berperan penting dalam siklus karbon global dan mitigasi perubahan iklim (Singh & Gu, 2010). Selain itu, mikroalga dan sianobakteri

dapat tumbuh pada berbagai kondisi lingkungan, termasuk perairan limbah, sehingga memiliki fleksibilitas tinggi dalam aplikasi bioteknologi (Brennan & Owende, 2010).

Sisi Kimia

Secara kimia, fotosintesis melibatkan reaksi reduksi CO₂ menjadi senyawa organik seperti glukosa menggunakan energi cahaya yang ditangkap oleh pigmen fotosintetik seperti klorofil (Nelson & Cox, 2021). Proses ini terdiri dari reaksi terang yang menghasilkan ATP dan NADPH, serta reaksi gelap (siklus Calvin) yang memfiksasi karbon menjadi senyawa organik (Madigan *et al.*, 2018). Biomassa yang dihasilkan oleh mikroalga kaya akan lipid, karbohidrat, dan protein, di mana lipid dapat dikonversi menjadi biodiesel melalui transesterifikasi, sedangkan karbohidrat dapat difermentasi menjadi bioetanol (Chisti, 2007).

Pemanfaatan

Mikroalga dimanfaatkan dalam sistem fotobioreaktor maupun kolam terbuka untuk produksi berbagai jenis biofuel, seperti biodiesel, bioetanol, dan biohidrogen (Brennan & Owende, 2010). Selain itu, mikroalga juga digunakan sebagai sistem penyerapan karbon (*carbon capture*) di industri karena kemampuannya menyerap CO₂ dalam jumlah besar selama

fotosintesis (Singh & Gu, 2010). Meskipun memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan, pengembangan teknologi mikroalga masih menghadapi tantangan utama, seperti tingginya biaya produksi, kebutuhan energi untuk pemanenan biomassa, serta efisiensi proses pada skala industri (Chisti, 2007).

D. Produksi Energi Berbasis Mikroba

1. Bioetanol (Fermentasi oleh Yeast)

Bioetanol merupakan bahan bakar cair yang dihasilkan melalui fermentasi gula oleh mikroorganisme, terutama yeast seperti *Saccharomyces cerevisiae*. Dalam proses ini, gula hasil hidrolisis biomassa dikonversi menjadi etanol dan karbon dioksida melalui jalur fermentasi alkohol yang berlangsung tanpa oksigen (anaerob) (Madigan *et al.*, 2018; Nelson & Cox, 2021). Bioetanol banyak digunakan sebagai bahan bakar alternatif atau campuran bensin karena sifatnya yang lebih ramah lingkungan dan dapat diperbarui.

Visualisasi:

Biomassa → Glukosa → (Yeast fermentasi) → Etanol + CO₂ + Energi

2. Biogas (CH₄ & CO₂) – Digesti Anaerobik

Biogas dihasilkan melalui proses digesti anaerobik, yaitu degradasi bahan organik oleh konsorsium mikroorganisme (bakteri dan archaea) dalam kondisi tanpa oksigen. Proses ini berlangsung dalam beberapa tahap, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis, yang pada akhirnya menghasilkan gas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂) sebagai produk utama. Biogas banyak dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk listrik dan pemanas.

Visualisasi:

Limbah organik → Hidrolisis → Asidogenesis → Asetogenesis → Metanogenesis → Biogas (CH₄ + CO₂)

3. Biodiesel (Lipid Mikroalga & Yeast Oleaginous)

Biodiesel diproduksi dari lipid yang dihasilkan oleh mikroorganisme seperti mikroalga dan yeast oleaginous. Mikroorganisme ini mampu mengakumulasi lipid dalam jumlah tinggi yang kemudian dikonversi menjadi biodiesel melalui reaksi transesterifikasi dengan alkohol (misalnya metanol) (Chisti, 2007). Biodiesel memiliki sifat mirip solar dan dapat digunakan langsung pada mesin diesel dengan emisi yang lebih rendah.

Visualisasi:

Mikroalga / Yeast → Lipid (trigliserida) →
(Transesterifikasi) → Biodiesel + Gliserol

4. Biobutanol & Biopropanol

Biobutanol dan biopropanol merupakan biofuel alkohol yang dihasilkan melalui fermentasi oleh bakteri seperti *Clostridium*. Dibandingkan bioetanol, biobutanol memiliki keunggulan berupa nilai energi yang lebih tinggi, volatilitas lebih rendah, dan kompatibilitas yang lebih baik dengan infrastruktur bahan bakar yang ada. Selain itu, biobutanol lebih sedikit menyerap air sehingga lebih stabil selama penyimpanan dan distribusi.

Glukosa → (Fermentasi *Clostridium*) → Butanol /
Propanol + CO₂ + Asam organik

5. Biohidrogen (Fermentasi Gelap & Fotobiologis)

Biohidrogen dihasilkan melalui dua mekanisme utama, yaitu fermentasi gelap (tanpa cahaya) dan proses fotobiologis oleh mikroorganisme fotosintetik. Pada fermentasi gelap, senyawa organik diuraikan menjadi asam organik, CO₂, dan H₂ oleh bakteri anaerob. Sementara itu, pada proses fotobiologis, cahaya digunakan untuk meningkatkan produksi hidrogen. Biohidrogen dianggap sebagai bahan

bakar bersih karena hanya menghasilkan air saat digunakan. Fermentasi gelap:

Glukosa $\rightarrow$ Asam organik + CO_2 + H_2

Fotobiologis:

Cahaya + H_2O /organik $\rightarrow$ H_2

6. **Microbial Fuel Cell (MFC)**

Microbial Fuel Cell (MFC) adalah sistem bioelektrokimia yang memanfaatkan mikroorganisme elektrogenik untuk mengonversi substrat organik secara langsung menjadi listrik. Dalam sistem ini, mikroba mengoksidasi bahan organik di anoda dan melepaskan elektron yang kemudian mengalir melalui rangkaian eksternal menuju katoda, menghasilkan arus listrik. Teknologi ini memiliki keunggulan karena dapat menghasilkan energi sekaligus mengolah limbah organik.

Substrat organik $\rightarrow$ (Mikroba di anoda) $\rightarrow$ Elektron $\rightarrow$ Rangkaian eksternal $\rightarrow$ Katoda $\rightarrow$ Listrik

E. **Optimasi Produksi Energi dalam Bioreaktor**

Optimasi produksi energi berbasis mikroorganisme dalam bioreaktor merupakan langkah krusial untuk meningkatkan efisiensi konversi substrat menjadi produk energi seperti bioetanol, biogas, biohidrogen, dan listrik. Proses ini melibatkan pendekatan multidisiplin yang mencakup rekayasa biologis, pengendalian parameter

operasional, serta integrasi sistem teknologi untuk mencapai produktivitas yang tinggi dan stabil. Berbagai strategi optimasi dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan biologis mikroorganisme dan kendala teknis pada skala industri (Rittmann & McCarty, 2020).

1. Rekayasa Genetika Mikroba untuk Meningkatkan Yield Energi

Rekayasa genetika merupakan pendekatan penting untuk meningkatkan efisiensi produksi energi dengan memodifikasi jalur metabolisme mikroorganisme. Melalui teknik ini, gen yang terlibat dalam produksi energi dapat diperkuat (*overexpression*), sementara jalur metabolik yang tidak diinginkan dapat dihambat atau dihapus (Stephanopoulos, 1999). Sebagai contoh, rekayasa pada *Saccharomyces cerevisiae* dapat meningkatkan toleransi terhadap etanol dan meningkatkan yield fermentasi, sedangkan modifikasi pada bakteri penghasil hidrogen dapat meningkatkan aktivitas enzim hidrogenase (Nielsen & Keasling, 2016). Pendekatan ini memungkinkan peningkatan produktivitas serta efisiensi konversi substrat menjadi energi.

2. Pemilihan Substrat Murah (Limbah Pertanian, Limbah Industri, Biomassa Lignoselulosa)

Pemilihan substrat merupakan faktor penting dalam optimasi biaya dan efisiensi proses

bioreaktor. Penggunaan bahan baku murah seperti limbah pertanian (jerami, bagasse), limbah industri (molase, limbah cair), serta biomassa lignoselulosa dapat menurunkan biaya produksi secara signifikan (Naik et al., 2010). Namun, biomassa lignoselulosa memerlukan tahap pretreatment untuk memecah struktur kompleks lignin dan selulosa agar dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme (Sun & Cheng, 2002). Pemanfaatan limbah sebagai substrat juga memberikan keuntungan tambahan berupa pengurangan pencemaran lingkungan.

3. Kontrol Kondisi Operasi (Suhu, pH, Nutrien, Rasio C/N)

Kondisi operasional bioreaktor seperti suhu, pH, ketersediaan nutrien, dan rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) sangat mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dan efisiensi produksi energi. Suhu optimal diperlukan untuk menjaga aktivitas enzimatis mikroba, sementara pH mempengaruhi stabilitas metabolisme dan pertumbuhan sel (Madigan *et al.*, 2018). Rasio C/N yang seimbang penting untuk mencegah akumulasi amonia atau kekurangan nutrien yang dapat menghambat proses fermentasi atau metanogenesis (Rittmann & McCarty, 2020). Oleh karena itu, kontrol

parameter ini secara real-time menjadi kunci dalam menjaga kestabilan proses.

4. Integrasi Sistem: Co-digestion dan Hybrid Bioreaktor

Integrasi sistem bioreaktor merupakan strategi untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas melalui kombinasi berbagai proses biologis. Co-digestion, yaitu pengolahan bersama beberapa jenis substrat, dapat meningkatkan keseimbangan nutrisi dan produksi biogas dibandingkan substrat tunggal (Mata-Alvarez *et al.*, 2014). Selain itu, penggunaan sistem hybrid seperti kombinasi fermentasi gelap dan fotobiologis atau integrasi *Microbial Fuel Cell* (MFC) dengan sistem pengolahan limbah dapat meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan (Logan *et al.*, 2008). Pendekatan ini memungkinkan pemanfaatan energi secara maksimal dari berbagai jalur metabolik mikroba.

5. Skalabilitas dari Laboratorium ke Industri

Salah satu tantangan utama dalam optimasi bioreaktor adalah skalabilitas, yaitu kemampuan untuk menerapkan proses dari skala laboratorium ke skala industri tanpa kehilangan efisiensi. Pada skala besar, faktor seperti transfer massa, pencampuran, distribusi nutrisi, dan kontrol suhu menjadi lebih kompleks (Garcia-Ochoa & Gomez,

2009). Selain itu, faktor ekonomi dan keberlanjutan juga harus dipertimbangkan dalam desain proses industri. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan rekayasa proses yang komprehensif untuk memastikan bahwa teknologi yang dikembangkan di laboratorium dapat diimplementasikan secara efektif pada skala komersial

F. Aplikasi dan Implementasi

Aplikasi bioteknologi energi berbasis mikroorganisme telah berkembang pesat dan menunjukkan potensi nyata dalam berbagai sektor, mulai dari transportasi hingga pengelolaan limbah. Implementasi teknologi ini tidak hanya berfokus pada produksi energi, tetapi juga pada keberlanjutan lingkungan dan efisiensi sumber daya. Berbagai sistem berbasis mikroba telah diterapkan dalam skala laboratorium hingga semi-industri sebagai bagian dari transisi menuju energi terbarukan (Doran, 2013; Stanbury *et al.*, 2020).

1. Energi alternatif untuk transportasi (bioetanol, biodiesel)

Penggunaan bioetanol dan biodiesel sebagai bahan bakar alternatif telah menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Bioetanol digunakan sebagai

campuran bensin (misalnya E10–E85), sedangkan biodiesel dapat langsung digunakan pada mesin diesel. Kedua jenis biofuel ini memiliki keunggulan dalam menurunkan emisi gas rumah kaca dan berasal dari sumber terbarukan seperti biomassa dan mikroalga (Mata *et al.*, 2010). Implementasi di sektor transportasi menunjukkan kontribusi signifikan dalam mendukung sistem energi berkelanjutan.

2. Pembangkit listrik berbasis MFC skala kecil

Microbial Fuel Cell (MFC) telah diaplikasikan sebagai sistem pembangkit listrik skala kecil, terutama untuk daerah terpencil atau sistem berbasis limbah. Dalam sistem ini, mikroorganisme mengoksidasi substrat organik dan menghasilkan listrik secara langsung melalui transfer elektron ke elektroda (Logan, 2009). Meskipun daya yang dihasilkan masih relatif rendah, teknologi ini sangat potensial untuk aplikasi seperti sensor lingkungan, perangkat skala kecil, dan sistem *off-grid* (Santoro *et al.*, 2017).

3. Produksi gas rumah tangga dari limbah organik (biogas)

Produksi biogas melalui digesti anaerobik telah banyak diterapkan pada skala rumah tangga dan komunitas, terutama di daerah pedesaan. Limbah

organik seperti kotoran ternak dan sisa makanan diolah dalam biodigester untuk menghasilkan gas metana yang dapat digunakan sebagai bahan bakar memasak atau penerangan (Doran, 2013). Teknologi ini tidak hanya menyediakan energi murah, tetapi juga membantu mengurangi limbah dan meningkatkan sanitasi lingkungan.

4. Kontribusi terhadap ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah

Teknologi energi berbasis mikroba mendukung konsep ekonomi sirkular dengan mengubah limbah menjadi sumber energi dan produk bernilai tambah. Limbah organik yang sebelumnya menjadi masalah lingkungan dapat dimanfaatkan sebagai substrat dalam bioreaktor untuk menghasilkan energi, pupuk, atau bahan kimia (Logan & Rabaey, 2012). Pendekatan ini meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

G. Tantangan dan Prospek

Meskipun memiliki potensi besar, pengembangan teknologi energi berbasis mikroorganisme masih menghadapi berbagai tantangan teknis, ekonomi, dan lingkungan. Namun, kemajuan teknologi modern memberikan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi dan daya saing sistem ini di masa depan.

1. Tantangan teknis: efisiensi rendah, kontaminasi, biaya skala industri

Salah satu kendala utama adalah efisiensi konversi energi yang masih relatif rendah dibandingkan sistem konvensional. Selain itu, kontaminasi mikroba lain dapat mengganggu stabilitas proses dalam bioreaktor, terutama pada sistem terbuka (Shuler *et al.*, 2017). Skala industri juga menghadapi tantangan dalam hal desain reaktor, transfer massa, dan kontrol proses yang kompleks.

2. Isu ekonomi: biaya produksi vs energi fosil

Secara ekonomi, biaya produksi bioenergi masih sering lebih tinggi dibandingkan bahan bakar fosil, terutama karena biaya bahan baku, pretreatment, dan operasional (Stanbury *et al.*, 2020). Hal ini menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi secara luas. Oleh karena itu, diperlukan inovasi untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya produksi.

3. Isu lingkungan: penggunaan lahan, residu, emisi sekunder

Pengembangan bioenergi juga menimbulkan isu lingkungan seperti penggunaan lahan untuk produksi biomassa, potensi limbah residu, serta emisi sekunder dari proses produksi (Mata *et al.*, 2010). Oleh karena itu, pendekatan berkelanjutan

seperti penggunaan limbah sebagai substrat menjadi sangat penting untuk meminimalkan dampak negatif.

4. Prospek ke depan: integrasi AI/IoT, rekayasa metabolik, CRISPR

Prospek masa depan teknologi ini sangat menjanjikan dengan adanya integrasi teknologi digital seperti AI dan IoT untuk menciptakan bioreaktor pintar yang mampu mengontrol kondisi secara otomatis dan real-time. Selain itu, kemajuan dalam rekayasa metabolik dan teknologi CRISPR memungkinkan pengembangan mikroorganisme super-produktif dengan efisiensi tinggi dalam menghasilkan energi (Nielsen & Keasling, 2016). Inovasi ini diharapkan dapat mengatasi berbagai keterbatasan yang ada saat ini.

H. Penutup

Mikroorganisme memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan karena kemampuannya mengonversi berbagai jenis substrat menjadi energi dalam bentuk gas, cair, maupun listrik. Berbagai teknologi seperti bioetanol, biogas, biohidrogen, dan Microbial Fuel Cell menunjukkan bahwa sistem biologis dapat menjadi alternatif yang berkelanjutan terhadap energi fosil.

Bioreaktor memainkan peran kunci dalam mengoptimalkan proses produksi energi berbasis mikroba, karena memungkinkan kontrol kondisi lingkungan yang diperlukan untuk aktivitas mikroorganisme. Oleh karena itu, pengembangan desain dan operasi bioreaktor menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi dan skalabilitas teknologi ini. Namun, untuk dapat bersaing dengan energi fosil, diperlukan penelitian lanjutan dan inovasi teknologi, terutama dalam meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya produksi, serta memastikan keberlanjutan lingkungan. Dengan dukungan teknologi modern dan kebijakan yang tepat, bioteknologi energi berbasis mikroba berpotensi menjadi pilar utama dalam sistem energi masa depan.

I. Daftar Pustaka

- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Balat, M., & Balat, H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 86(11), 2273–2282.
- Boone, D. R., Castenholz, R. W., & Garrity, G. M. (2001). *Bergey's manual of systematic bacteriology* (2nd ed.). Springer.

- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extraction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
- Conrad, R. (2007). Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Advances in Agronomy*, 96, 1–63.
- Das, D., & Veziroğlu, T. N. (2008). Advances in biological hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21), 6046–6057.
- Demirbas, A. (2007). Progress and recent trends in biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(1), 1–18.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources*. Wiley-VCH.
- Doran, P. M. (2013). *Bioprocess engineering principles* (2nd ed.). Academic Press.
- Ferry, J. G. (2010). How to make a living by exhaling methane. *Annual Review of Microbiology*, 64, 453–473.
- Garcia-Ochoa, F., & Gomez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes. *Biotechnology Advances*, 27(2), 153–176.
- Hallenbeck, P. C. (2009). Fermentative hydrogen production: Principles, progress, and prognosis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17), 7379–7389.
- Hallenbeck, P. C., & Benemann, J. R. (2002). Biological hydrogen production; fundamentals and limiting

- processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(11–12), 1185–1193.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman.
- Levin, D. B., Pitt, L., & Love, M. (2004). Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(2), 173–185.
- Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), 375–381.
- Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science*, 337(6095), 686–690.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192.
- Logan, B. E., et al. (2008). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. *Environmental Science & Technology*, 42(23), 8630–8640.
- Lovley, D. R. (2006). Microbial fuel cells: Novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 17(3), 327–332.

- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427.
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8th ed.). W.H. Freeman.
- Nielsen, J., & Keasling, J. D. (2016). Engineering cellular metabolism. *Cell*, 164(6), 1185–1197.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543.
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291–298.
- Rabaey, K., et al. (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: Electricity-driven and driving communities. *The ISME Journal*, 1, 9–18.

- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2020). *Environmental biotechnology: Principles and applications* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Rogers, P. L., Lee, K. J., & Skotnicki, M. L. (2007). *Zymomonas mobilis* for fuel ethanol and higher value products. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 108, 263–288.
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *Journal of Power Sources*, 356, 225–244.
- Schlegel, H. G. (1993). *General microbiology* (7th ed.). Cambridge University Press.
- Shuler, M. L., Kargi, F., & DeLisa, M. P. (2017). *Bioprocess engineering: Basic concepts* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Singh, J., & Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2596–2610.
- Stanbury, P. F., Whitaker, A., & Hall, S. J. (2020). *Principles of fermentation technology* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Stams, A. J. M. (1994). Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antonie van Leeuwenhoek*, 66, 271–294.
- Stephanopoulos, G. (1999). Metabolic fluxes and metabolic engineering. *Metabolic Engineering*, 1(1), 1–11.
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production. *Bioresource Technology*, 83(1), 1–11.

- Thauer, R. K. (1998). Biochemistry of methanogenesis: A tribute to Marjory Stephenson. *Microbiology*, 144(9), 2377–2406.
- Thauer, R. K., Kaster, A. K., Seedorf, H., Buckel, W., & Hedderich, R. (2008). Methanogenic archaea: Ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews Microbiology*, 6(8), 579–591.
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972–974.
- Walker, G. M. (2011). *Pichia pastoris and Saccharomyces cerevisiae: Biotechnology and fermentation*. Springer.

BAB 3

PEMANFAATAN BIOPOLIMER CERDAS UNTUK KEMASAN AKTIF DAN PENGAWETAN PANGAN

Oleh: Ummi Zahra

A. Pendahuluan

Kebutuhan akan kemasan pangan inovatif semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi global, perubahan gaya hidup, serta meningkatnya permintaan terhadap produk pangan yang praktis, aman, dan memiliki umur simpan yang lebih panjang. Distribusi pangan yang semakin luas dan kompleks menuntut adanya sistem kemasan yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung fisik, tetapi juga mampu menjaga kualitas, keamanan, dan nilai gizi produk. Selain itu, meningkatnya kesadaran konsumen terhadap kesehatan dan lingkungan turut mendorong pengembangan teknologi kemasan yang lebih ramah lingkungan serta mampu memberikan informasi tambahan terkait kondisi produk. Oleh karena itu, inovasi dalam bidang kemasan pangan menjadi aspek penting dalam industri pangan modern (Robertson, 2016; Marsh & Bugusu, 2007).

Kemasan konvensional yang umumnya berbasis plastik petrokimia seperti polietilena (PE), polipropilena (PP), dan polietilena tereftalat (PET) masih mendominasi

penggunaannya karena sifatnya yang ringan, kuat, dan ekonomis. Di sisi lain, material ini memiliki kelemahan signifikan yaitu sulit terurai secara alami sehingga menyebabkan akumulasi limbah plastik di lingkungan. Plastik dapat bertahan hingga ratusan tahun dan berkontribusi terhadap pencemaran tanah, air, dan laut, termasuk terbentuknya mikroplastik yang berpotensi membahayakan organisme hidup serta kesehatan manusia. Selain itu, produksi plastik berbasis petrokimia juga bergantung pada sumber daya fosil yang tidak terbarukan serta menghasilkan emisi gas rumah kaca, sehingga memperparah isu lingkungan global (Siracusa, 2012; Marsh & Bugusu, 2007).

Respon terhadap permasalahan tersebut, berkembang konsep kemasan aktif (*active packaging*) dan kemasan cerdas (*smart packaging*) sebagai inovasi dalam sistem kemasan pangan. Kemasan aktif dirancang untuk berinteraksi secara langsung dengan produk atau lingkungan di dalam kemasan, seperti melalui penyerap oksigen, pengontrol kelembaban, atau pelepasan senyawa antimikroba dan antioksidan untuk memperpanjang umur simpan. Sementara itu, kemasan cerdas berfungsi untuk memantau kondisi produk dan memberikan informasi kepada konsumen, misalnya melalui indikator waktu-suhu, sensor gas, atau perubahan warna. Integrasi kedua konsep ini tidak hanya meningkatkan perlindungan produk, tetapi juga

mendukung keamanan pangan, mengurangi pemborosan, serta meningkatkan transparansi informasi kepada konsumen (Han, 2014; Robertson, 2016).

Dalam mendukung pengembangan kemasan yang berkelanjutan dan inovatif tersebut, biopolimer menjadi salah satu alternatif material yang menjanjikan. Biopolimer berasal dari sumber daya terbarukan seperti polisakarida (pati, selulosa, kitosan), protein (gelatin, kasein), dan lipid, serta memiliki sifat biodegradable dan biokompatibel yang lebih ramah lingkungan dibandingkan plastik konvensional. Selain itu, beberapa biopolimer memiliki sifat fungsional seperti aktivitas antimikroba dan kemampuan membentuk film yang baik, sehingga dapat diaplikasikan dalam kemasan aktif. Penggunaan biopolimer juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan berbasis petrokimia serta menekan dampak lingkungan, sehingga berperan penting dalam menciptakan sistem kemasan pangan yang tidak hanya aman dan efektif, tetapi juga berkelanjutan (Rhim *et al.*, 2013; Ahmed & Varshney, 2011).

B. Konsep Biopolimer Cerdas

Biopolimer merupakan polimer alami yang berasal dari sumber daya terbarukan dan semakin banyak digunakan sebagai alternatif bahan kemasan konvensional. Biopolimer dapat berasal dari berbagai

sumber, seperti polisakarida (misalnya pati, selulosa, dan kitosan), protein (seperti gelatin dan kasein), serta polimer berbasis asam laktat seperti polilaktat (PLA). Keunggulan utama biopolimer terletak pada sifatnya yang biodegradable, biokompatibel, dan ramah lingkungan, sehingga mampu mengurangi ketergantungan terhadap plastik berbasis petrokimia yang sulit terurai. Selain itu, biopolimer juga memiliki kemampuan untuk membentuk film dan lapisan pelindung yang dapat diaplikasikan dalam sistem kemasan pangan modern (Rhim *et al.*, 2013; Ahmed & Varshney, 2011).

Seiring dengan perkembangan teknologi, biopolimer tidak hanya berfungsi sebagai bahan pasif, tetapi juga dapat dikembangkan menjadi material “cerdas” yang mampu merespons perubahan lingkungan. Karakteristik cerdas ini mencakup kemampuan untuk mendeteksi dan bereaksi terhadap parameter tertentu seperti perubahan pH, suhu, konsentrasi gas (misalnya oksigen atau karbon dioksida), serta kelembaban. Respons tersebut dapat berupa perubahan warna, perubahan sifat mekanik, atau pelepasan senyawa aktif tertentu. Kemampuan ini menjadikan biopolimer sebagai komponen penting dalam pengembangan sistem kemasan yang adaptif dan responsif terhadap kondisi penyimpanan maupun kualitas produk pangan (Han, 2014; Siracusa, 2012). Dalam teknologi kemasan modern, biopolimer memiliki

berbagai fungsi strategis yang tidak hanya terbatas pada perlindungan fisik produk. Biopolimer dapat berperan sebagai matriks pembawa senyawa aktif seperti antimikroba dan antioksidan, yang membantu menghambat pertumbuhan mikroorganisme serta memperlambat oksidasi pangan. Selain itu, biopolimer juga dapat digunakan sebagai bahan dasar dalam pembuatan lapisan *edible coating* yang dapat dimakan, sehingga meningkatkan keamanan pangan dan mengurangi limbah kemasan. Dengan fleksibilitas sifat dan kemampuannya untuk dimodifikasi, biopolimer menjadi salah satu komponen kunci dalam pengembangan kemasan berkelanjutan yang efisien dan inovatif (Robertson, 2016; Rhim *et al.*, 2013).

Dalam konteks inovasi kemasan pangan, penting untuk membedakan antara konsep kemasan aktif dan kemasan cerdas yang seringkali saling melengkapi. Kemasan aktif merupakan jenis kemasan yang dirancang untuk berinteraksi langsung dengan produk atau lingkungan di dalam kemasan guna memperpanjang umur simpan. Contohnya meliputi penggunaan agen antimikroba, antioksidan, serta penyerap oksigen atau kelembaban yang dapat menghambat kerusakan pangan. Di sisi lain, kemasan cerdas berfungsi sebagai sistem pemantauan yang memberikan informasi mengenai kondisi produk, seperti indikator kesegaran, sensor gas, atau label perubahan warna yang

menunjukkan tingkat kualitas pangan. Dengan demikian, kemasan aktif berfokus pada fungsi protektif, sedangkan kemasan cerdas berfokus pada fungsi informatif, dan keduanya dapat dikombinasikan untuk menghasilkan sistem kemasan yang lebih efektif dan aman (Han, 2014; Marsh & Bugusu, 2007).

C. Jenis dan Sumber Biopolimer

Biopolimer yang digunakan dalam kemasan pangan dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber dan komposisi kimianya, salah satunya adalah kelompok polisakarida. Polisakarida seperti kitosan, pati, selulosa, dan alginat banyak dimanfaatkan karena sifatnya yang biodegradable, tidak toksik, serta memiliki kemampuan membentuk film yang baik. Kitosan, misalnya, dikenal memiliki aktivitas antimikroba yang efektif terhadap berbagai mikroorganisme, sedangkan pati dan selulosa banyak digunakan karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang relatif rendah. Alginat juga memiliki kemampuan membentuk gel dan film yang stabil, sehingga sering digunakan dalam aplikasi *edible coating*. Secara umum, polisakarida berperan penting dalam pengembangan kemasan ramah lingkungan dengan fungsi protektif dan aktif (Ahmed & Varshney, 2011; Rhim *et al.*, 2013). Selain polisakarida, biopolimer berbasis protein juga memiliki peran signifikan dalam teknologi kemasan pangan. Protein seperti gelatin,

kasein, dan zein mampu membentuk film tipis yang transparan dan fleksibel dengan sifat penghalang yang baik terhadap gas tertentu. Gelatin banyak digunakan karena kemampuannya membentuk film yang kuat dan mudah larut, sedangkan kasein memiliki sifat emulsifikasi yang baik. Zein, protein dari jagung, memiliki sifat hidrofobik yang membuatnya efektif sebagai pelapis untuk mengurangi kehilangan kelembaban. Biopolimer protein ini sering dimanfaatkan sebagai *edible coating* karena aman dikonsumsi dan dapat meningkatkan kualitas serta umur simpan produk pangan (Han, 2014; Robertson, 2016).

Di samping biopolimer alami, terdapat pula polimer sintetis yang berasal dari sumber terbarukan, seperti polilaktat (PLA) dan polihidroksialkanoat (PHA). PLA merupakan polimer yang dihasilkan dari fermentasi asam laktat dan memiliki sifat mekanik yang baik serta transparansi tinggi, sehingga banyak digunakan sebagai alternatif plastik konvensional. Sementara itu, PHA diproduksi oleh mikroorganisme melalui proses bioteknologi dan memiliki sifat biodegradable serta kompatibel dengan lingkungan. Kedua jenis polimer ini menjadi solusi menjanjikan dalam mengurangi dampak lingkungan dari kemasan plastik, meskipun masih menghadapi tantangan dalam hal biaya produksi dan sifat mekanik tertentu (Siracusa, 2012; Rhim *et al.*, 2013).

Untuk meningkatkan kinerja dan fungsi biopolimer, pengembangan komposit biopolimer menjadi salah satu pendekatan yang banyak diteliti. Komposit ini dibuat dengan mengombinasikan biopolimer dengan nanopartikel seperti seng oksida (ZnO), perak (Ag), dan titanium dioksida (TiO_2). Penambahan nanopartikel dapat meningkatkan sifat mekanik, ketahanan terhadap permeabilitas gas, serta memberikan aktivitas antimikroba yang lebih efektif. Selain itu, nanopartikel juga dapat memberikan sifat tambahan seperti respons terhadap cahaya atau perubahan lingkungan, sehingga mendukung pengembangan kemasan aktif dan cerdas. Dengan demikian, komposit biopolimer menawarkan potensi besar dalam menciptakan sistem kemasan yang lebih fungsional, inovatif, dan berkelanjutan (Rhim *et al.*, 2013; Han, 2014).

D. Inovasi Kemasan Cerdas Berbasis Biopolimer

Perkembangan teknologi kemasan pangan telah mendorong lahirnya inovasi kemasan cerdas berbasis biopolimer yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung, tetapi juga sebagai indikator kualitas produk secara real-time. Salah satu inovasi yang banyak dikembangkan adalah indikator pH dan kesegaran, yaitu kemasan berbasis biopolimer yang dipadukan dengan pewarna alami seperti antosianin dan kurkumin. Senyawa-senyawa ini memiliki sifat sensitif terhadap

perubahan pH yang biasanya terjadi selama proses kerusakan pangan, sehingga mampu menunjukkan perubahan warna sebagai tanda penurunan kualitas atau kesegaran produk. Teknologi ini banyak diaplikasikan pada produk pangan mudah rusak seperti daging dan ikan, karena dapat memberikan informasi visual yang mudah dipahami oleh konsumen (Han, 2014; Ahmed & Varshney, 2011).

Selain indikator pH, inovasi lain dalam kemasan cerdas berbasis biopolimer adalah pengembangan sensor gas yang mampu mendeteksi senyawa volatil seperti karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), dan hidrogen sulfida (H_2S). Gas-gas ini umumnya dihasilkan selama proses pembusukan pangan, terutama pada produk protein hewani. Film biopolimer yang dikombinasikan dengan pewarna sensitif gas dapat mengalami perubahan warna atau sifat optik ketika bereaksi dengan gas tertentu, sehingga memberikan indikasi dini terhadap kerusakan produk. Penggunaan sensor gas ini sangat penting dalam meningkatkan keamanan pangan dan mengurangi risiko konsumsi produk yang telah mengalami degradasi (Siracusa, 2012; Han, 2014).

Inovasi lainnya mencakup pengembangan sensor kelembaban dan suhu berbasis biopolimer, yang bekerja dengan prinsip perubahan sifat fisik atau optik material terhadap kondisi lingkungan. Biopolimer tertentu dapat

mengalami perubahan struktur, transparansi, atau fleksibilitas ketika terpapar perubahan suhu dan kelembaban, sehingga dapat digunakan sebagai indikator kondisi penyimpanan. Teknologi ini sangat relevan dalam rantai distribusi pangan, khususnya untuk produk yang sensitif terhadap fluktuasi suhu dan kelembaban, seperti produk beku atau segar. Dengan adanya sistem ini, kualitas produk dapat dipantau secara lebih efektif selama proses penyimpanan dan distribusi (Robertson, 2016; Siracusa, 2012).

Lebih lanjut, integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam kemasan biopolimer membuka peluang baru dalam pengembangan kemasan cerdas yang lebih canggih. Dalam sistem ini, biopolimer dapat dikombinasikan dengan biosensor elektronik yang mampu mendeteksi perubahan kondisi pangan dan mengirimkan data secara *real-time* melalui perangkat digital. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kualitas pangan secara jarak jauh, meningkatkan efisiensi logistik, serta memberikan transparansi informasi kepada produsen dan konsumen. Integrasi antara material biopolimer yang ramah lingkungan dengan teknologi digital menjadikan kemasan cerdas sebagai solusi masa depan dalam sistem keamanan dan distribusi pangan (Han, 2014; Robertson, 2016).

E. Produksi Energi Berbasis Mikroba

Penerapan biopolimer dalam kemasan pangan telah berkembang pesat dan menunjukkan potensi besar dalam berbagai jenis produk, terutama pada bahan pangan yang mudah rusak seperti daging dan ikan. Pada produk ini, kemasan berbasis biopolimer sering dikombinasikan dengan agen antimikroba seperti kitosan, minyak esensial, atau nanopartikel untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk. Teknologi ini mampu memperpanjang umur simpan serta menjaga kualitas sensorik produk selama penyimpanan. Selain itu, penggunaan indikator berbasis biopolimer juga dapat membantu mendeteksi perubahan kualitas daging dan ikan secara visual melalui perubahan warna akibat aktivitas mikroba (Rhim *et al.*, 2013; Appendini & Hotchkiss, 2002).

Pada buah dan sayuran, biopolimer banyak digunakan dalam bentuk *edible coating* yang berfungsi sebagai lapisan pelindung yang dapat dimakan. *Edible coating* berbasis polisakarida atau protein mampu mengurangi laju respirasi, kehilangan air, serta oksidasi, sehingga memperlambat proses pematangan dan pembusukan. Selain itu, lapisan ini juga dapat diperkaya dengan senyawa aktif seperti antioksidan dan antimikroba untuk meningkatkan efektivitasnya. Aplikasi ini sangat penting dalam menjaga kesegaran produk

hortikultura selama distribusi dan penyimpanan (Dhall, 2013; Baldwin *et al.*, 1995).

Dalam produk olahan susu, penggunaan film biopolimer yang mengandung antioksidan menjadi salah satu strategi untuk mencegah oksidasi lemak yang dapat menurunkan kualitas dan cita rasa produk. Biopolimer seperti protein dan polisakarida dapat digunakan sebagai matriks pembawa senyawa antioksidan alami, misalnya ekstrak tanaman atau vitamin tertentu. Dengan demikian, kemasan tidak hanya berfungsi sebagai pelindung fisik, tetapi juga berperan aktif dalam menjaga stabilitas kimia produk selama penyimpanan (Han, 2014; Gómez-Estaca *et al.*, 2014).

Pada produk bakery, tantangan utama adalah pertumbuhan jamur yang dapat menyebabkan kerusakan produk dalam waktu singkat. Oleh karena itu, kemasan aktif berbasis biopolimer yang mengandung agen antijamur seperti minyak esensial atau senyawa alami lainnya banyak dikembangkan. Kemasan ini mampu menghambat pertumbuhan kapang tanpa perlu penambahan bahan pengawet sintesis secara langsung ke dalam produk, sehingga lebih aman dan sesuai dengan tren pangan alami. Hal ini menjadikan biopolimer sebagai solusi efektif dalam memperpanjang umur simpan produk bakery (Coma, 2008; Quintavalla & Vicini, 2002).

Selain itu, pada produk minuman, inovasi kemasan cerdas berbasis biopolimer mulai diterapkan dalam bentuk indikator kesegaran. Indikator ini biasanya menggunakan pewarna alami yang sensitif terhadap perubahan pH atau komposisi kimia minuman, sehingga dapat memberikan sinyal visual apabila terjadi perubahan kualitas. Teknologi ini memberikan nilai tambah bagi konsumen karena memungkinkan pemantauan kondisi produk secara langsung tanpa harus membuka kemasan. Penggunaan biopolimer dalam sistem ini juga mendukung aspek keberlanjutan karena materialnya yang ramah lingkungan (Kuswandi *et al.*, 2011; Han, 2014).



Gambar 1. Kemasan berbagai produk

F. Aplikasi pada Produk Pangan

Penerapan biopolimer dalam kemasan pangan telah berkembang pesat dan menunjukkan potensi besar dalam berbagai jenis produk, terutama pada bahan pangan yang mudah rusak seperti daging dan ikan. Pada produk ini, kemasan berbasis biopolimer sering dikombinasikan dengan agen antimikroba seperti kitosan, minyak esensial, atau nanopartikel untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk. Teknologi ini mampu memperpanjang umur simpan serta menjaga kualitas sensorik produk selama penyimpanan. Selain itu, penggunaan indikator berbasis biopolimer juga dapat membantu mendeteksi

perubahan kualitas daging dan ikan secara visual melalui perubahan warna akibat aktivitas mikroba (Rhim *et al.*, 2013; Appendini & Hotchkiss, 2002).

Pada buah dan sayuran, biopolimer banyak digunakan dalam bentuk *edible coating* yang berfungsi sebagai lapisan pelindung yang dapat dimakan. *Edible coating* berbasis polisakarida atau protein mampu mengurangi laju respirasi, kehilangan air, serta oksidasi, sehingga memperlambat proses pematangan dan pembusukan. Selain itu, lapisan ini juga dapat diperkaya dengan senyawa aktif seperti antioksidan dan antimikroba untuk meningkatkan efektivitasnya. Aplikasi ini sangat penting dalam menjaga kesegaran produk hortikultura selama distribusi dan penyimpanan (Dhall, 2013; Baldwin *et al.*, 1995).

Dalam produk olahan susu, penggunaan film biopolimer yang mengandung antioksidan menjadi salah satu strategi untuk mencegah oksidasi lemak yang dapat menurunkan kualitas dan cita rasa produk. Biopolimer seperti protein dan polisakarida dapat digunakan sebagai matriks pembawa senyawa antioksidan alami, misalnya ekstrak tanaman atau vitamin tertentu. Dengan demikian, kemasan tidak hanya berfungsi sebagai pelindung fisik, tetapi juga berperan aktif dalam menjaga stabilitas kimia produk selama penyimpanan (Han, 2014; Gómez-Estaca *et al.*, 2014).



Gambar 1. Kemasan aktif dan Cerdas

Pada produk bakery, tantangan utama adalah pertumbuhan jamur yang dapat menyebabkan kerusakan produk dalam waktu singkat. Oleh karena itu, kemasan aktif berbasis biopolimer yang mengandung agen antijamur seperti minyak esensial atau senyawa alami lainnya banyak dikembangkan. Kemasan ini mampu menghambat pertumbuhan kapang tanpa perlu penambahan bahan pengawet sintetis secara langsung ke dalam produk, sehingga lebih aman dan sesuai dengan tren pangan alami. Hal ini menjadikan biopolimer sebagai solusi efektif dalam memperpanjang umur simpan produk bakery (Coma, 2008; Quintavalla & Vicini, 2002).

Selain itu, pada produk minuman, inovasi kemasan cerdas berbasis biopolimer mulai diterapkan dalam bentuk indikator kesegaran. Indikator ini biasanya menggunakan pewarna alami yang sensitif terhadap perubahan pH atau komposisi kimia minuman, sehingga dapat memberikan sinyal visual apabila terjadi perubahan kualitas. Teknologi ini memberikan nilai tambah bagi konsumen karena memungkinkan pemantauan kondisi produk secara langsung tanpa harus membuka kemasan. Penggunaan biopolimer dalam sistem ini juga mendukung aspek keberlanjutan karena materialnya yang ramah lingkungan (Kuswandi *et al.*, 2011; Han, 2014).

G. Daftar Pustaka

- Ahmed, J., & Varshney, S. K. (2011). Polysaccharides based edible films and coatings: A review. *Food Hydrocolloids*.
- Appendini, P., & Hotchkiss, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*.
- Baldwin, E. A., Nisperos-Carriedo, M. O., & Baker, R. A. (1995). Edible coatings for lightly processed fruits and vegetables. *HortScience*.
- Coma, V. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat Science*.
- Dhall, R. K. (2013). Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.
- Gómez-Estaca, J., López-de-Dicastillo, C., Hernández-Muñoz, P., Catalá, R., & Gavara, R. (2014). Advances in antioxidant active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*.
- Han, J. H. (2014). *Innovations in Food Packaging*. Academic Press.
- Kuswandi, B., Jayus, Larasati, T. S., Abdullah, A., & Heng, L. Y. (2011). Real-time monitoring of shrimp spoilage using on-package colorimetric sensor. *Food Control*.

- Marsh, K., & Bugusu, B. (2007). Food packaging—roles, materials, and environmental issues. *Journal of Food Science*, 72(3), R39–R55.
- Quintavalla, S., & Vicini, L. (2002). Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat Science*.
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*.
- Robertson, G. L. (2016). *Food Packaging: Principles and Practice*. CRC Press.
- Siracusa, V. (2012). Food packaging permeability behaviour: A report. *International Journal of Polymer Science*.

BAB 4

KIMIA SENSOR FLUORESENSI DALAM DETEKSI POLUTAN DAN BIOMARKER PENYAKIT

Oleh: Arfiani Nur

A. Pendahuluan

Kebutuhan akan deteksi cepat, sensitif, dan selektif terhadap berbagai polutan lingkungan serta biomarker penyakit telah mendorong kemajuan teknologi sensor kimia, khususnya sensor berbasis fluoresensi. Metode ini menjadi salah satu pendekatan paling menjanjikan dalam kimia analitik modern karena kemampuannya dalam memberikan respons optik yang kuat, cepat, dan spesifik terhadap target analit, baik berupa ion logam, molekul organik, maupun biomolekul (Sedgwick *et al.*, 2018).

Di bidang lingkungan, berbagai senyawa berbahaya seperti logam berat (Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+}), pestisida, dan senyawa organik beracun semakin sering terdeteksi dalam air, tanah, dan udara sebagai akibat dari aktivitas industri dan pertanian. Polutan ini dapat menimbulkan efek toksik bahkan pada konsentrasi sangat rendah. Sensor fluoresensi menawarkan solusi deteksi yang efisien, portabel, dan ramah lingkungan dibandingkan metode analisis konvensional seperti AAS, ICP-MS, atau

GC-MS yang mahal dan membutuhkan waktu serta tenaga ahli (Yang et al., 2020; Wang & Yan, 2020).

Sementara itu, dalam bidang kesehatan, deteksi biomarker penyakit secara *real-time* menjadi krusial dalam mendiagnosis kondisi medis secara dini, termasuk penyakit kronis, infeksi, hingga kanker. Sensor fluoresensi memungkinkan pendeteksian molekul biologis seperti glukosa, asam amino, protein spesifik, bahkan DNA/RNA target dengan sensitivitas tinggi dan potensi untuk dikembangkan sebagai alat *point-of-care diagnostics* (Lee et al., 2015; Wang & Liu, 2009).

Keunggulan utama sensor fluoresensi terletak pada mekanisme transduksi optik yang memungkinkan visualisasi perubahan intensitas atau pergeseran panjang gelombang emisi akibat interaksi antara molekul sensor dan analit target. Mekanisme ini dapat berupa "*turn-on*", "*turn-off*", atau ratiometrik, tergantung pada strategi desain sensor yang digunakan (Kim et al., 2011). Kemajuan dalam sintesis material seperti quantum dots, karbon nanodots, logam kompleks, serta molekul organik π -terkonjugasi, telah memperluas cakupan dan efektivitas sensor fluoresensi terhadap berbagai target, baik di lingkungan maupun dalam sistem biologis (Li et al., 2022).

Lebih jauh, integrasi sensor fluoresensi dengan teknologi berbasis mikrofluidik dan perangkat portabel seperti smartphone, membuka jalan bagi

pengembangan sistem deteksi lapangan yang murah, mudah digunakan, dan dapat diakses oleh masyarakat umum maupun fasilitas kesehatan di daerah terpencil (Chen *et al.*, 2023).

Bab ini akan mengulas secara sistematis prinsip dasar fluoresensi, strategi desain sensor fluoresen, serta aplikasinya dalam mendeteksi polutan lingkungan dan biomarker penyakit. Melalui pendekatan interdisipliner antara kimia analitik, kimia material, dan bioteknologi, pembahasan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi sensor yang inovatif dan aplikatif di berbagai bidang.

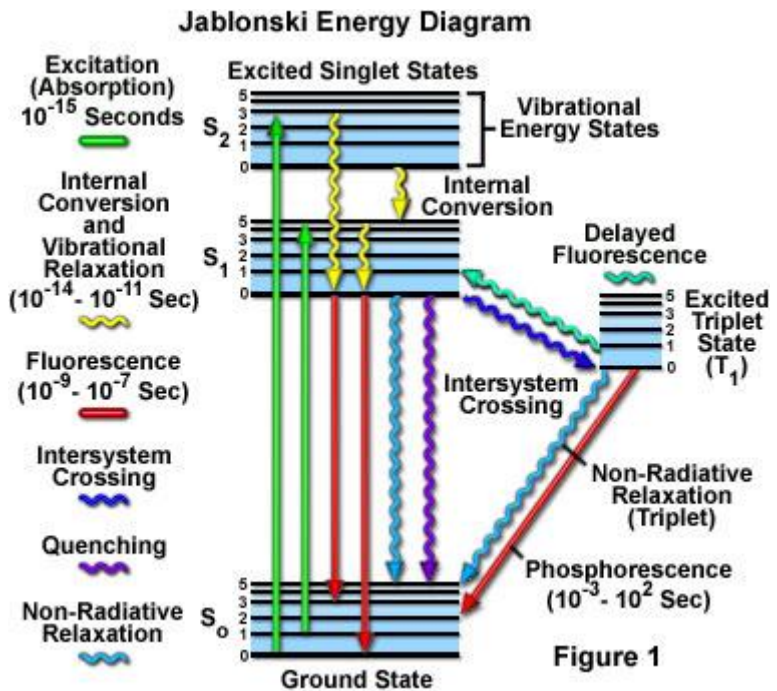
B. Dasar Teori Fluoresensi

Fluoresensi merupakan fenomena fotofisika yang terjadi ketika suatu molekul menyerap energi dari cahaya (biasanya ultraviolet atau tampak) dan memancarkan kembali sebagian energi tersebut sebagai cahaya dengan panjang gelombang yang lebih panjang (energi lebih rendah) (Valeur & Berberan-Santos, 2012). Proses ini umumnya berlangsung dalam hitungan nanodetik dan banyak dimanfaatkan dalam teknik analisis karena sensitivitas serta selektivitasnya yang tinggi terhadap perubahan lingkungan molekulik.

1. Prinsip Dasar Fluoresensi

Proses fluoresensi dapat dijelaskan melalui diagram Jablonski (Gambar 1), yang menggambarkan

perpindahan elektron dari keadaan dasar singlet (S_0) ke keadaan tereksitasi singlet pertama (S_1) setelah penyinaran cahaya. Setelah mengalami peluruhan non-radiatif sebagian, elektron kembali ke keadaan dasar dengan memancarkan cahaya fluoresen (Lakowicz, 2006). Perbedaan energi antara panjang gelombang eksitasi dan emisi dikenal sebagai Stokes shift, yang sangat penting untuk menghindari interferensi sinyal saat pengukuran.



Gambar 1. Diagram Jablonski

2. Parameter Kunci dalam Fluoresensi

Beberapa parameter penting yang menentukan efisiensi dan keandalan sistem fluoresensi antara lain:

- a) *Kuantum yield* (Φ_f): Rasio antara jumlah foton yang dipancarkan dan jumlah foton yang diserap. Nilai Φ_f tinggi menandakan efisiensi fluoresensi yang tinggi.
- b) *Fluorescence lifetime* (τ): Waktu rata-rata yang dihabiskan molekul dalam keadaan tereksitasi sebelum memancarkan foton. Informasi ini penting dalam teknik *time-resolved fluorescence* (Lakowicz, 2006).
- c) *Stokes shift*: Selisih energi antara panjang gelombang eksitasi dan emisi, yang besarnya dapat mengurangi gangguan sinyal latar belakang (Valeur & Berberan-Santos, 2012).
- d) *Photostability*: Kemampuan molekul untuk mempertahankan sifat fluoresen setelah terpapar cahaya berulang-ulang.

3. Jenis Fluoresensi dan Fenomena Terkait

Fluoresensi dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme atau kondisi eksitasi:

- a) *Steady-state fluorescence*: Mengukur intensitas emisi pada kondisi stasioner.
- b) *Time-resolved fluorescence*: Mengukur peluruhan emisi seiring waktu untuk memperoleh informasi dinamis.

- c) *Upconversion fluorescence*: Emisi cahaya pada panjang gelombang lebih pendek daripada eksitasi, umum terjadi pada nanomaterial doped-lanthanide (Wang & Liu, 2009).
- d) *Excited State Intramolecular Proton Transfer* (ESIPT): Proses proton transfer dalam keadaan tereksitasi yang menghasilkan *dual-emission* dan sensitivitas tinggi terhadap lingkungan (Sedgwick *et al.*, 2018).
- e) *Förster Resonance Energy Transfer* (FRET): Mekanisme transfer energi antar dua kromofor yang berdekatan, digunakan dalam biosensor untuk pengukuran interaksi biomolekul (Li *et al.*, 2022).

4. Keunggulan Metode Fluoresensi dalam Sensor

Metode fluoresensi menonjol karena mampu memberikan deteksi ultra-sensitif, kompatibel dengan lingkungan biologis, dan dapat diintegrasikan dengan teknologi portabel. Selain itu, fluoresensi memungkinkan visualisasi waktu nyata (*real-time*) baik di lingkungan maupun dalam sistem biologis hidup (Chen *et al.*, 2023).

C. Desain Sensor Fluoresensi

Desain sensor fluoresensi merupakan kunci utama dalam menentukan sensitivitas, selektivitas, dan kestabilan respon terhadap analit target. Sensor

fluoresensi ideal harus dapat mengenali analit secara spesifik, memberikan sinyal yang dapat diukur secara kuantitatif, serta mampu beroperasi di lingkungan yang kompleks, seperti matriks biologis atau sampel lingkungan.

1. Molekul Sensor Berbasis Senyawa Organik

Molekul organik dengan elektron π -terkonjugasi merupakan platform paling umum dalam desain sensor fluoresensi karena kemudahan sintesis, tunabilitas optik, dan kompatibilitas biologisnya. Gugus-gugus seperti fluorene, naphthalimide, coumarin, dan BODIPY sering digunakan sebagai bagian fluorofoor (Wang *et al.*, 2018). Sensor ini sering dimodifikasi dengan gugus pengenalan (receptor unit) yang spesifik terhadap target, seperti gugus amina untuk asam nukleat atau gugus sulfonat untuk logam alkali tanah.

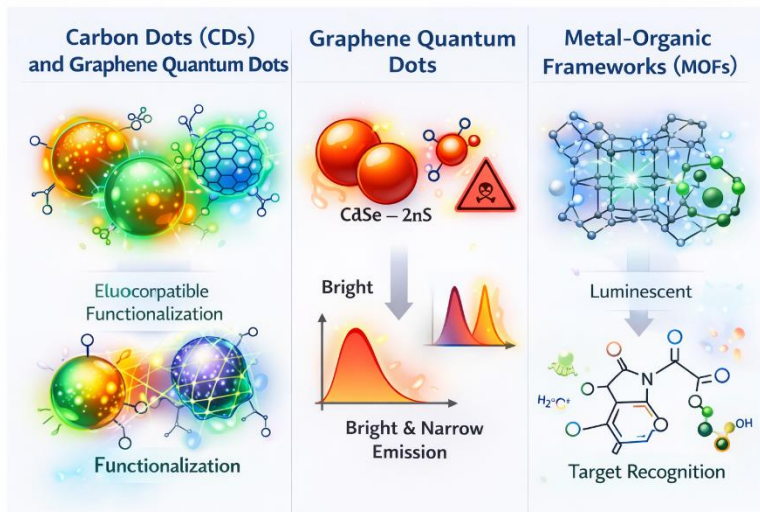
2. Sensor Berbasis Kompleks Logam

Kompleks logam seperti ruthenium(II), iridium(III), dan europium(III) menunjukkan sifat fluoresensi atau luminesensi yang kuat dan stabil, serta umumnya menunjukkan *lifetime* yang panjang. Sensor ini cocok untuk aplikasi dalam sistem biologis karena sinyalnya lebih mudah dibedakan dari autofluoresensi seluler (Lo & Zissel, 2018).

3. Nanomaterial Fluoresen

Kemajuan dalam nanoteknologi telah melahirkan berbagai material fluoresen baru yang sangat efektif sebagai sensor (Gambar 2):

- a) *Carbon dots* (CDs) dan *graphene quantum dots* memiliki keunggulan biokompatibilitas, kestabilan fotokimia, serta kemudahan fungsionalisasi (Li *et al.*, 2022).
- b) *Semiconductor quantum dots* (QDs) seperti CdSe dan ZnS menawarkan *brightness* tinggi dan narrow emission spectra, namun menghadapi tantangan toksisitas.
- c) *Metal-organic frameworks* (MOFs) dengan sifat luminesen juga berkembang pesat sebagai sensor yang dapat dimodifikasi secara struktural dan selektif terhadap berbagai target (Wang & Yan, 2020).



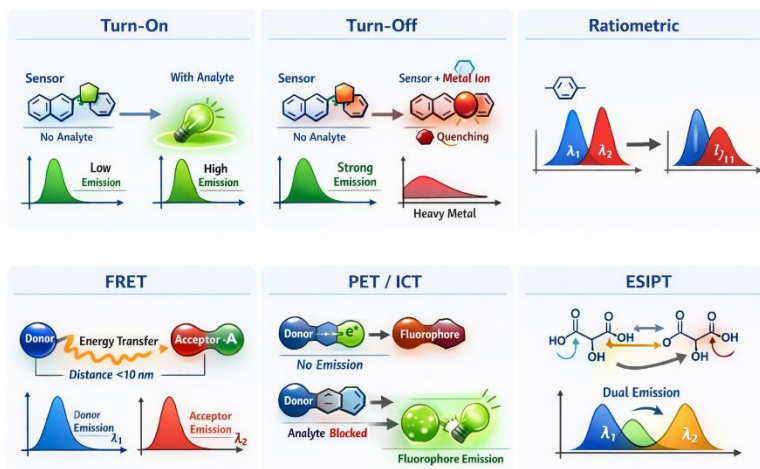
Gambar 2. Ilstrasi Nanomaterial Fluoresen

4. Mekanisme Deteksi Fluoresensi

Mekanisme transduksi sinyal fluoresen sangat menentukan karakter sensor. Beberapa mekanisme umum meliputi (Gambar 3):

- Turn-on*: Fluoresensi meningkat saat berikatan dengan analit (contoh: destruksi quenching oleh target).
- Turn-off*: Fluoresensi teredam akibat interaksi dengan analit (contoh: quenching oleh logam berat).
- Ratiometrik: Perubahan rasio dua emisi pada panjang gelombang berbeda, meningkatkan akurasi kuantifikasi (Kim *et al.*, 2011).

- d) *Förster Resonance Energy Transfer* (FRET): Transfer energi non-radiatif antara donor dan akseptor fluorofoor, sensitif terhadap jarak molekulik.
- e) *Photoinduced Electron Transfer* (PET) dan *Intramolecular Charge Transfer* (ICT): Perubahan intensitas emisi akibat perubahan distribusi muatan saat pengikatan target.
- f) *Excited-State Intramolecular Proton Transfer* (ESIPT): Menyediakan emisi dual-band dengan sensitivitas tinggi terhadap polaritas dan pH (Sedgwick *et al.*, 2018).



Gambar 3. Ilustrasi Mekanisme Deteksi Fluoresensi

5. Strategi Fungsionalisasi dan Selektivitas

Agar sensor memiliki selektivitas tinggi, diperlukan desain molekular yang memperhatikan kecocokan bentuk, muatan, dan sifat interaksi spesifik dengan analit. Fungsionalisasi dapat dilakukan melalui:

- a) Penggabungan gugus pengenalan spesifik (e.g., *crown ether* untuk ion logam alkali).
- b) Modifikasi permukaan nanomaterial dengan ligand biomolekular seperti aptamer atau antibodi.
- c) Penggunaan molekul pengenalan spesifik seperti enzim atau host molekul (e.g., cucurbituril, cyclodextrin).

Desain sensor yang baik akan mengombinasikan antara pilihan fluorofofor, mekanisme transduksi, dan receptor unit secara sinergis, menghasilkan sistem deteksi yang sensitif, selektif, dan aplikatif di berbagai kondisi.

D. Aplikasi dalam Deteksi Polutan

Polusi lingkungan yang disebabkan oleh logam berat, pestisida, anion beracun, dan senyawa organik volatil telah menjadi masalah global yang serius. Sensor fluoresensi menawarkan metode deteksi yang sensitif, selektif, cepat, dan tidak merusak sampel, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi pemantauan lingkungan. Fluorofofor yang difungsionalisasi dengan reseptor selektif

mampu mengenali dan merespons berbagai kontaminan dengan perubahan sinyal fluoresen yang nyata.

1. Deteksi Ion Logam Berat

Ion logam berat seperti Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , dan Cu^{2+} sangat beracun meskipun dalam konsentrasi rendah. Sensor fluoresensi yang dirancang dengan gugus donor elektron (seperti $-\text{SH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$) dapat membentuk kompleks dengan ion logam tersebut, menghasilkan mekanisme *quenching* atau *enhancement fluoresensi*. Sebagai contoh, sensor berbasis *carbon dots* (CDs) menunjukkan *quenching fluoresensi* yang spesifik terhadap Hg^{2+} melalui pembentukan kompleks CD-Hg^{2+} (Zhou *et al.*, 2020). Sensor berbasis rhodamine untuk deteksi Cu^{2+} juga telah dikembangkan dengan respons visual yang cepat dan sensitivitas tinggi (Liu *et al.*, 2021).

2. Deteksi Senyawa Organik Berbahaya dan Pestisida

Pestisida dan senyawa organik volatil (VOCs) merupakan ancaman serius bagi kesehatan manusia dan ekosistem. Sensor fluoresensi untuk pestisida, seperti organofosfat, biasanya memanfaatkan interaksi enzimatik atau pengikatan langsung oleh fluorofor yang difungsionalisasi. Contohnya, sensor berbasis MOF yang dimodifikasi dengan molekul detektor spesifik mampu mendeteksi paraoxon, sejenis pestisida organofosfat, dengan LOD hingga sub-nanomolar (Wang *et al.*, 2021). Untuk VOCs seperti formaldehida dan benzena, digunakan sensor berbasis ICT atau PET yang

menghasilkan perubahan intensitas atau pergeseran panjang gelombang fluoresen.

3. Deteksi Anion Beracun

Anion seperti CN^- , NO_2^- , dan PO_4^{3-} dapat menyebabkan kerusakan biologis dan ekologis. Sensor fluoresensi untuk anion biasanya didesain dengan situs pengikatan berbasis proton donor atau reseptor logam, menghasilkan perubahan sinyal melalui deprotonasi atau kompleksasi. Sensor berbasis ESIPT menunjukkan *dual-emission* yang responsif terhadap F^- atau CN^- , yang menyebabkan perubahan rasio intensitas emisi (Zhao *et al.*, 2019). Sensor ratiometrik ini dinilai lebih akurat dibandingkan sensor *turn-on/off* karena mampu mengoreksi gangguan matriks sampel.

4. Studi Kasus dan Penerapan Lapangan

Sensor fluoresensi telah diterapkan secara langsung dalam pemantauan kualitas air, tanah, dan udara. Beberapa sensor dikembangkan dalam bentuk pad kertas, sistem mikrofluidik, atau sensor berbasis smartphone untuk deteksi cepat dan portabel. Contohnya, Li *et al.* (2020) mengembangkan sensor berbasis *paper-strip* yang menunjukkan fluoresensi biru-hijau yang berubah warna saat mendeteksi Pb^{2+} dalam air sungai. Pengujian *in situ* di berbagai wilayah menunjukkan kinerja sensor setara dengan metode spektroskopi konvensional, namun jauh lebih murah dan cepat.

5. Perbandingan Sensor untuk Polutan Umum

5.1 Tabel Perbandingan Sensor untuk Polutan Umum

Polutan	Fluorofor/Material	Mekanisme	LOD ($\mu\text{M}/\text{nM}$)	Referensi
Hg^{2+}	<i>Carbon dots (CDs)</i>	<i>Fluorescence quenching</i>	5 nM	Zhou <i>et al.</i> , 2020
Cu^{2+}	<i>Rhodamine derivative</i>	<i>Ring-opening turn-on</i>	0.8 μM	Liu <i>et al.</i> , 2021
Paraoxon	<i>Zr-MOF functionalized</i>	<i>Binding-induced turn-off</i>	0.2 nM	Wang <i>et al.</i> , 2021
CN^-	<i>ESIPT-based fluorophore</i>	<i>Ratiometrik ESIPT</i>	30 nM	Zhao <i>et al.</i> , 2019
Pb^{2+}	<i>Paper-based CDs</i>	<i>Turn-on (colorimetric + fluoresen)</i>	1.5 μM	Li <i>et al.</i> , 2020

E. Aplikasi dalam Deteksi Biomarker Penyakit

Deteksi dini penyakit sangat bergantung pada kemampuan untuk mengenali biomarker secara sensitif dan selektif, terutama dalam cairan biologis seperti darah, urin, atau air liur. Sensor fluoresensi telah merevolusi bidang diagnostik medis dengan menyediakan metode yang cepat, non-invasif, dan sangat sensitif untuk mendeteksi berbagai biomarker,

seperti ion logam abnormal, molekul kecil (glukosa, H_2O_2 , NO), asam nukleat, enzim, serta protein spesifik.

1. Deteksi Ion Biologis dan Molekul Kecil

Ion seperti Zn^{2+} , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} memainkan peran penting dalam fungsi neurologis dan metabolisme. Ketidakseimbangan ion-ion ini sering terkait dengan gangguan saraf atau metabolik. Sensor fluoresensi berbasis BODIPY dan coumarin telah dikembangkan untuk mendeteksi ion-ion ini secara selektif dengan perubahan emisi warna (Han *et al.*, 2020).

Molekul kecil lain seperti glukosa dan hidrogen peroksida (H_2O_2) juga penting sebagai biomarker. Sensor fluoresensi berbasis reaksi enzimatik atau reaksi redoks (misalnya dengan peroksidase) digunakan untuk deteksi glukosa dan H_2O_2 dalam sistem biologis (Chen *et al.*, 2019).

2. Deteksi Asam Nukleat dan microRNA

Asam nukleat spesifik, termasuk DNA mutan dan microRNA (miRNA), menjadi target utama dalam diagnosis kanker, penyakit neurodegeneratif, dan infeksi virus. Sensor fluoresensi berbasis hybridisasi DNA atau aptamer sering digunakan untuk mengenali urutan target. Contohnya, sensor berbasis FRET yang menggunakan *quantum dots* sebagai donor dan *gold nanoparticles* sebagai akseptor telah menunjukkan kinerja tinggi dalam mendeteksi miRNA-21, biomarker

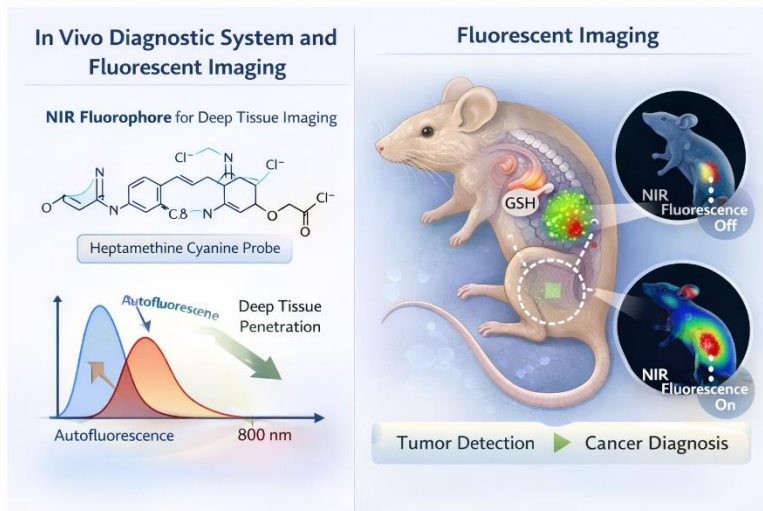
kanker payudara dan kolorektal, dengan limit deteksi mencapai fM (Guo *et al.*, 2021).

3. Deteksi Protein dan Enzim

Protein abnormal, seperti PSA (*Prostate-Specific Antigen*), CEA (*Carcinoembryonic Antigen*), dan β -amyloid, merupakan indikator utama dari kanker dan Alzheimer. Sensor berbasis aptamer fluoresen atau antibodi telah dikembangkan untuk deteksi spesifik protein ini. Sebagai contoh, sensor berbasis aptamer-coumarin untuk deteksi PSA menunjukkan sensitivitas tinggi dengan waktu respon di bawah 5 menit (Zhang *et al.*, 2020). Enzim seperti caspase dan protease juga menjadi target deteksi dalam riset apoptosis dan kanker.

4. Sistem Diagnostik *In Vivo* dan Imaging Fluoresen

Selain deteksi *in vitro*, beberapa sensor fluoresensi telah dikembangkan untuk aplikasi *bioimaging* secara langsung dalam sel atau jaringan hidup. Sensor berbasis fluorofoor NIR (*Near-Infrared*) sangat efektif untuk imaging karena memiliki penetrasi jaringan yang lebih dalam dan autofluoresensi rendah (Gambar 4). Misalnya, probe fluoresen berbasis heptamethine cyanine telah digunakan untuk mendeteksi tumor melalui visualisasi distribusi glutathione (GSH) secara *in vivo*, membantu dalam diagnosis kanker dan monitoring terapi (Gambar 4) (Zhou *et al.*, 2021).



Banyak sensor fluoresensi menunjukkan performa optimal di lingkungan buatan (buffer atau pelarut organik), namun kehilangan sensitivitas atau selektivitas dalam sampel nyata seperti darah, urin, atau air limbah. Gangguan matriks dan keberadaan analit serupa menjadi penyebab utama rendahnya akurasi pengukuran.

b) Fotostabilitas dan Ketahanan Kimia

Beberapa fluorofofor mengalami *fotobleaching* saat terkena cahaya dalam jangka panjang, membatasi aplikasi *in vivo* atau pemantauan jangka panjang. Fluorofofor juga harus tahan terhadap degradasi kimia dalam berbagai kondisi pH, suhu, dan keberadaan ion lain.

c) Kuantifikasi Absolut dan Reprodusibilitas

Banyak sensor masih bersifat semi-kuantitatif atau hanya memberikan hasil visual (*turn-on/off*). Pengembangan sensor yang mampu memberikan kuantifikasi absolut dengan kalibrasi universal dan hasil yang dapat direproduksi tetap menjadi tantangan penting.

d) Integrasi dengan Teknologi Portabel

Meskipun telah banyak dikembangkan, integrasi sensor fluoresensi ke dalam perangkat portabel, *wearable devices*, atau sistem *point-of-care* diagnosis masih memerlukan penyempurnaan

teknologi, terutama dalam aspek miniaturisasi, komunikasi data, dan kecerdasan sistem.

2. Prospek dan Arah Riset Masa Depan

a) Pengembangan Fluorofor Generasi Baru

Fluorofor baru seperti nanopartikel karbon, dots berbasis logam, MOF fluoresen, dan fluorofor NIR-II menjadi fokus utama karena menawarkan keunggulan dalam sensitivitas tinggi, penetrasi jaringan, dan fotostabilitas (Sun *et al.*, 2021). Fluorofor berbasis supramolekul dan *bio-inspired dyes* juga menjadi tren baru.

b) Sensor Ratiometrik dan Multimodal

Sensor ratiometrik yang menggunakan dua panjang gelombang emisi memungkinkan pengukuran yang lebih akurat, mengurangi gangguan lingkungan. Sementara itu, pendekatan multimodal, seperti kombinasi fluoresensi dengan SERS (*Surface-Enhanced Raman Scattering*), elektrokimia, atau fototermal, memungkinkan deteksi ganda dalam satu sistem (Liu *et al.*, 2020).

c) Artificial Intelligence dan Internet of Things (IoT)

Integrasi AI dan IoT memungkinkan pengolahan data secara *real-time*, prediksi tren deteksi, serta pengendalian jarak jauh dalam sistem sensor fluoresensi. Kombinasi ini sangat potensial untuk aplikasi medis portabel dan pemantauan lingkungan berbasis *cloud*.

d) Aplikasi Klinis dan Komersialisasi

Upaya translasi sensor fluoresensi ke dalam aplikasi klinis semakin intensif. Diperlukan validasi klinis, uji toksisitas, dan sertifikasi regulator agar sensor dapat digunakan dalam diagnosis penyakit atau sebagai alat bantu pemantauan terapi (Chen *et al.*, 2021).

G. Penutup

Kimia sensor fluoresensi telah berkembang menjadi salah satu pendekatan analitik yang paling menjanjikan dalam deteksi polutan lingkungan dan biomarker penyakit. Keunggulannya yang meliputi sensitivitas tinggi, selektivitas yang baik, respon cepat, serta kemampuan untuk melakukan deteksi secara *real-time* menjadikan teknologi ini sangat relevan dalam menjawab tantangan kesehatan dan lingkungan di era modern. Dalam konteks pencemaran lingkungan, sensor fluoresensi mampu mengidentifikasi berbagai kontaminan seperti logam berat, pestisida, dan senyawa organik berbahaya dengan akurasi tinggi, sehingga berkontribusi dalam upaya monitoring dan pengendalian kualitas lingkungan. Sementara itu, dalam bidang kesehatan, aplikasi sensor fluoresensi dalam mendeteksi biomarker penyakit membuka peluang besar untuk diagnosis dini, pemantauan terapi, dan pengembangan sistem *point-of-care* yang lebih efisien.

Meskipun demikian, masih terdapat berbagai tantangan yang perlu diatasi, seperti peningkatan stabilitas sensor, minimisasi interferensi dari matriks sampel kompleks, serta pengembangan material fluoresen yang lebih ramah lingkungan dan biokompatibel. Selain itu, integrasi teknologi ini dengan sistem digital, seperti biosensor berbasis perangkat portabel dan kecerdasan buatan, menjadi arah pengembangan yang sangat potensial untuk meningkatkan akurasi dan aksesibilitas.

Ke depan, sinergi antara ilmu kimia, nanoteknologi, bioteknologi, dan ilmu kesehatan akan menjadi kunci dalam mendorong inovasi sensor fluoresensi yang lebih adaptif dan aplikatif. Dengan dukungan riset yang berkelanjutan serta kolaborasi lintas disiplin, kimia sensor fluoresensi diharapkan tidak hanya menjadi alat deteksi, tetapi juga menjadi bagian integral dalam sistem pencegahan penyakit dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Oleh karena itu, penguatan kapasitas penelitian dan implementasi teknologi ini, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia, menjadi langkah strategis dalam mewujudkan pembangunan kesehatan dan lingkungan yang berkelanjutan.

H. Daftar Pustaka

- Chen, J., Zhang, L., & Wang, Y. (2021). *Translational development of fluorescent biosensors for clinical diagnostics: current status and future perspectives*. *Biosensors and Bioelectronics*, 190, 113433. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113433>
- Liu, Q., Zhu, Z., & Zhang, X. (2020). *Fluorescent-SERS bimodal sensors for ultrasensitive detection of biological and environmental targets*. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 129, 115963. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115963>
- Sun, Y., Wu, M., & Hao, Y. (2021). *Near-infrared-II fluorophores for biomedical imaging and cancer therapy: Progress and perspectives*. *Chemical Society Reviews*, 50(3), 1513–1542. <https://doi.org/10.1039/D0CS00449C>
- Chen, Y., Wang, M., & Wu, L. (2019). *Fluorescent biosensors based on redox-active molecules for the detection of hydrogen peroxide and glucose*. *Biosensors and Bioelectronics*, 132, 360–372. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.02.056>
- Guo, Y., Li, Z., & Liu, D. (2021). *Fluorescent biosensors for detection of microRNAs based on FRET and nanomaterials*. *Biosensors and Bioelectronics*, 180, 113108. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113108>

- Han, M., Li, Y., & Zhang, W. (2020). *A BODIPY-based ratiometric fluorescent probe for selective detection of Zn²⁺ in living cells*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 313, 128024. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128024>
- Zhang, L., Zhou, Y., & Chen, X. (2020). *Coumarin-functionalized aptamer fluorescent sensor for rapid detection of prostate-specific antigen*. *Talanta*, 216, 120942. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120942>
- Zhou, J., Yu, F., & Liu, Y. (2021). *Near-infrared fluorescent probes for in vivo bioimaging of glutathione in tumor models*. *Chemical Science*, 12(3), 945–957. <https://doi.org/10.1039/D0SC04529G>
- Li, S., Liu, J., Li, Y., & Ma, H. (2020). *Portable fluorescent paper-based sensor for Pb²⁺ detection in environmental water samples*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 320, 128417. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128417>
- Liu, Y., Yu, D., & Zhang, H. (2021). *A rhodamine-based fluorescent chemosensor for highly selective detection of Cu²⁺ in water and living cells*. *Dyes and Pigments*, 185, 108911. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108911>
- Wang, X., Zhang, R., & Li, H. (2021). *Luminescent metal-organic frameworks for sensitive detection of organophosphorus pesticides*. *Journal of Hazardous*

- Materials, 403, 123715.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123715>
- Zhao, Q., Li, Y., & Guo, X. (2019). *Dual-emission ESIPT-based fluorescent probe for selective detection of cyanide in aqueous media*. *Analytica Chimica Acta*, 1052, 63–70.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.11.027>
- Zhou, L., Zhang, Z., & Wu, P. (2020). *Carbon dot-based fluorescent sensor for ultrasensitive detection of Hg²⁺ in environmental water*. *Environmental Research*, 186, 109527.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109527>
- Kim, H. N., Guo, Z., Zhu, W., Yoon, J., & Tian, H. (2011). *Recent progress on polymer-based fluorescent and colorimetric chemosensors*. *Chemical Society Reviews*, 40(1), 79–93.
<https://doi.org/10.1039/C0CS00030A>
- Li, H., Zhang, Y., & Wang, Y. (2022). *Carbon dots-based fluorescent sensors for environmental and biological applications*. *Coordination Chemistry Reviews*, 459, 214414. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214414>
- Lo, K. K.-W., & Ziessel, R. (2018). *Transition metal complexes as luminescent probes in bioimaging and biosensing*. *Coordination Chemistry Reviews*, 375, 535–553. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.03.012>
- Sedgwick, A. C., Wu, L., Han, H. H., Bull, S. D., He, X. P., James, T. D., Sessler, J. L., & Tang, B. Z. (2018). *Excited-*

- state intramolecular proton-transfer (ESIPT)-based fluorescence sensors and imaging agents*. Chemical Society Reviews, 47(23), 8842–8880. <https://doi.org/10.1039/C8CS00344H>
- Wang, Y., & Yan, B. (2020). Metal–organic frameworks for environment-responsive luminescent sensing: A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*, 423, 213513. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213513>
- Wang, R., Yu, C., & Yu, J. (2018). Design strategies and applications of fluorescent probes for detecting biological analytes. *Trends in Analytical Chemistry*, 108, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.020>
- Chen, A., Yang, S., & Wang, Y. (2023). Smartphone-based fluorescence sensors for point-of-care diagnostics and environmental monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, 225, 115100. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115100>
- Lakowicz, J. R. (2006). *Principles of fluorescence spectroscopy (3rd ed.)*. Springer.
- Li, H., Zhang, Y., & Wang, Y. (2022). *Carbon dots-based fluorescent sensors for environmental and biological applications*. *Coordination Chemistry Reviews*, 459, 214414. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214414>
- Sedgwick, A. C., Wu, L., Han, H. H., Bull, S. D., He, X. P., James, T. D., Sessler, J. L., & Tang, B. Z. (2018). *Excited-state intramolecular proton-transfer (ESIPT)-based*

- fluorescence sensors and imaging agents*. Chemical Society Reviews, 47(23), 8842–8880. <https://doi.org/10.1039/C8CS00344H>
- Valeur, B., & Berberan-Santos, M. N. (2012). *Molecular fluorescence: Principles and applications* (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Wang, F., & Liu, X. (2009). *Recent advances in the chemistry of lanthanide-doped upconversion nanocrystals*. Chemical Society Reviews, 38(4), 976–989. <https://doi.org/10.1039/B809132N>
- Chen, A., Yang, S., & Wang, Y. (2023). *Smartphone-based fluorescence sensors for point-of-care diagnostics and environmental monitoring*. Biosensors and Bioelectronics, 225, 115100. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115100>
- Kim, H. N., Guo, Z., Zhu, W., Yoon, J., & Tian, H. (2011). *Recent progress on polymer-based fluorescent and colorimetric chemosensors*. Chemical Society Reviews, 40(1), 79–93. <https://doi.org/10.1039/C0CS00030A>
- Lee, M. H., Kim, J. S., & Sessler, J. L. (2015). *Small molecule-based ratiometric fluorescence probes for cations, anions, and biomolecules*. Chemical Society Reviews, 44(13), 4185–4191. <https://doi.org/10.1039/C4CS00341A>
- Li, H., Zhang, Y., & Wang, Y. (2022). *Carbon dots-based fluorescent sensors for environmental and biological*

- applications*. Coordination Chemistry Reviews, 459, 214414. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214414>
- Sedgwick, A. C., Wu, L., Han, H. H., Bull, S. D., He, X. P., James, T. D., Sessler, J. L., & Tang, B. Z. (2018). *Excited-state intramolecular proton-transfer (ESIPT)-based fluorescence sensors and imaging agents*. Chemical Society Reviews, 47(23), 8842–8880. <https://doi.org/10.1039/C8CS00344H>
- Wang, F., & Liu, X. (2009). *Recent advances in the chemistry of lanthanide-doped upconversion nanocrystals*. Chemical Society Reviews, 38(4), 976–989. <https://doi.org/10.1039/B809132N>
- Wang, Y., & Yan, B. (2020). *Metal–organic frameworks for environment-responsive luminescent sensing: A critical review*. Coordination Chemistry Reviews, 423, 213513. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213513>
- Yang, Y., Wang, J., & Liu, X. (2020). *Fluorescent sensors for the detection of heavy metal ions in water: Recent advances and future prospects*. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 124, 115801. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115801>

BAB 5

PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA UNTUK PRODUKSI BIOFUEL DAN BAHAN KIMIA BERNILAI TINGGI

Oleh: Rina Setyawati

A. Pendahuluan

Limbah biomassa adalah sisa material organik yang berasal dari tumbuhan maupun hewan yang sudah tidak digunakan lagi dan dapat mengalami penguraian secara alami. Limbah ini biasanya dihasilkan dari kegiatan pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan, maupun industri pengolahan hasil hayati. Contohnya meliputi:

1. Sisa tanaman seperti jerami, sekam padi, tongkol jagung
2. Limbah kayu seperti serbuk gergaji dan potongan kayu
3. Kotoran hewan (feses ternak)
4. Limbah organik rumah tangga seperti sisa makanan

Limbah biomassa dapat diolah menjadi sumber energi terbarukan, seperti biogas dan bioetanol, serta dimanfaatkan sebagai pupuk kompos yang ramah lingkungan. Dengan pengelolaan yang tepat, limbah biomassa dapat membantu mengurangi pencemaran lingkungan, dan juga menjadi solusi dalam memenuhi

kebutuhan energi dan mendukung pertanian yang lebih sehat.

Pemanfaatan limbah biomassa untuk produksi biofuel dan bahan kimia bernilai tinggi merupakan langkah inovatif dalam mengubah limbah organik menjadi sumber daya yang bermanfaat. Limbah biomassa yang sebelumnya dianggap tidak bernilai, seperti jerami, sekam padi, dan limbah kayu, kini dapat diolah melalui berbagai teknologi menjadi biofuel seperti biogas dan bioetanol sebagai energi pengganti yang lebih ramah lingkungan. Biomassa juga dapat dikonversi menjadi bahan kimia bernilai tinggi untuk digunakan dalam industri, seperti asam organik, bioplastik, dan senyawa bioaktif. Dengan demikian, pemanfaatan dapat mengurangi pencemaran lingkungan dan meningkatkan nilai ekonomi limbah serta mendukung pengembangan industri kedepannya.

B. Jenis dan Sumber Biomassa

Jenis dan sumber biomassa mencakup berbagai bahan organik yang berasal dari aktivitas alam maupun kegiatan manusia, yang memiliki potensi besar sebagai bahan baku biofuel dan bahan kimia bernilai tinggi. Limbah pertanian yang kaya akan kandungan lignoselulosa, seperti sekam padi dan tongkol jagung dapat menjadi sumber biomassa yang melimpah. Limbah kehutanan, seperti serbuk gergaji, potongan kayu, dan

kulit kayu, juga memiliki potensi tinggi karena kandungan seratnya yang dapat dikonversi menjadi energi atau produk kimia. Selain itu, limbah industri, khususnya dari industri pengolahan pangan dan hasil pertanian, serta limbah peternakan seperti kotoran hewan, dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku melalui proses biokonversi. Setiap jenis biomassa memiliki karakteristik yang berbeda, seperti kadar air, kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang akan mempengaruhi metode pengolahan serta jenis produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap jenis dan sumber biomassa menjadi langkah penting dalam menentukan teknologi konversi yang tepat dan optimal.

C. Produk Biomassa

Produk dan nilai tambah biomassa mencerminkan hasil akhir dari proses pengolahan bahan organik menjadi berbagai produk yang bermanfaat dan bernilai ekonomi tinggi. Biomassa dapat diubah menjadi biofuel seperti bioetanol, biogas, dan biodiesel, yang berpotensi menjadi pengganti bahan bakar fosil karena lebih ramah lingkungan serta mendukung ketersediaan energi di masa depan. Biofuel yang dihasilkan dari biomassa, seperti bioetanol, biodiesel, dan biogas, dapat digunakan di berbagai sektor terutama dalam transportasi, industri, dan rumah tangga, sebagai alternatif pengganti bahan

bakar fosil. Keunggulan utama biofuel terletak pada sifatnya yang lebih ramah lingkungan karena menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah serta dapat diperbarui secara alami melalui siklus hayati. Selain itu, pemanfaatan biomassa untuk biofuel juga dapat meningkatkan ketahanan energi, terutama pada negara-negara yang memiliki sumber daya hayati yang melimpah, dengan menekan ketergantungan terhadap impor bahan bakar fosil. Pengembangan biofuel juga dapat menciptakan peluang ekonomi melalui penyediaan lapangan kerja pada sektor pertanian, pengolahan, dan distribusi energi, sehingga memberikan manfaat baik dari aspek lingkungan maupun sosial ekonomi.

D. Konversi Biomassa Menjadi Bahan Kimia Bernilai tinggi

Teknologi konversi biomassa merupakan serangkaian proses yang digunakan untuk mengubah bahan organik menjadi biofuel dan bahan kimia bernilai tinggi melalui pendekatan biologis, kimia, maupun termokimia. Proses biologis seperti fermentasi memanfaatkan mikroorganisme untuk mengubah gula dalam biomassa menjadi bioetanol, sedangkan *anaerobic digestion* menghasilkan biogas melalui proses penguraian bahan organik oleh bakteri dalam kondisi anaerob atau tanpa adanya oksigen. Sementara itu, pada proses termokimia

seperti pirolisis dilakukan dengan memanaskan biomassa tanpa adanya oksigen untuk dapat menghasilkan bio-oil, gas, dan arang, serta gasifikasi yang mengubah biomassa menjadi gas sintetis (syngas) melalui pembakaran terbatas. Selain itu, konsep biorefinery mengintegrasikan berbagai teknologi konversi untuk menghasilkan beragam produk secara efisien dari satu jenis biomassa, sehingga meningkatkan nilai tambah dan meminimalkan limbah.

Biomassa dapat juga dikonversi menjadi bahan kimia bernilai tinggi lainnya, seperti asam organik (seperti asam laktat dan asam asetat), bioplastik, serta senyawa lain yang berpotensi dimanfaatkan dalam industri pangan, farmasi, dan kosmetik. Selain dapat meningkatkan nilai ekonomi dari limbah yang belum optimal dimanfaatkan sebelumnya, tetapi juga tetapi juga memberikan manfaat bagi lingkungan melalui pengurangan limbah, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta mendukung konsep ekonomi sirkular. Dengan demikian, pengolahan biomassa menjadi berbagai produk bernilai tambah menjadi solusi strategis dalam mengurangi limbah lingkungan, menyediakan energi alternatif, serta meningkatkan nilai ekonomi sumber daya biomassa.

Selain dimanfaatkan sebagai sumber energi, biomassa juga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam menghasilkan bahan kimia bernilai

tinggi melalui proses konversi lanjutan. Komponen utama biomassa yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin dapat diuraikan menjadi molekul sederhana yang kemudian diolah menjadi berbagai produk kimia, seperti asam organik, alkohol, pelarut ramah lingkungan, hingga bahan dasar bioplastik. Pendekatan ini dikenal sebagai konsep biorefinery, yaitu pengolahan biomassa secara terpadu untuk menghasilkan berbagai produk secara efisien dan minim limbah, mirip dengan kilang minyak pada industri petrokimia. Keunggulan utama dari bahan kimia berbasis biomassa adalah sifatnya yang lebih berkelanjutan, biodegradable, dan menekan ketergantungan terhadap bahan baku fosil. Pengembangan bahan kimia bernilai tinggi dari biomassa juga membuka peluang inovasi di berbagai sektor industri, seperti farmasi, kosmetik, dan material maju, sehingga meningkatkan nilai ekonomi dari biomassa sekaligus mendukung ekonomi hijau.

Penjelasan yang lebih spesifik mengenai pemanfaatan biomassa menjadi bahan kimia bernilai tinggi dapat dilihat dari jenis senyawa yang dihasilkan serta jalur konversinya. Komponen lignoselulosa dari biomassa yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dapat dihidrolisis menjadi gula sederhana seperti glukosa dan xilosa, yang kemudian difermentasi menjadi produk seperti asam laktat (bahan baku bioplastik PLA), asam suksinat (untuk resin dan pelarut), serta bioetanol

tingkat lanjut. Selain itu, melalui proses dehidrasi, gula dari biomassa dapat diubah menjadi senyawa platform seperti 5-hidroksimetilfurfural (HMF) dan furfural yang menjadi prekursor penting dalam industri kimia, termasuk produksi plastik ramah lingkungan dan bahan bakar sintetis. Lignin, yang sebelumnya sering dianggap limbah, kini juga dapat diolah menjadi senyawa aromatik bernilai tinggi yang digunakan dalam industri perekat, bahan bakar, dan material karbon. Pendekatan ini menunjukkan bahwa biomassa dapat digunakan sebagai bahan baku strategis untuk menggantikan produk berbasis petrokimia secara lebih ramah lingkungan.

Aplikasi pengembangan biomassa menunjukkan peran pentingnya dalam berbagai sektor, mulai dari energi, kimia, hingga manufaktur. Biofuel seperti bioetanol dan biodiesel telah banyak digunakan sebagai campuran bahan bakar di sektor transportasi, sementara biogas dimanfaatkan untuk kebutuhan energi rumah tangga dan pembangkit listrik. Di sektor industri kimia, biomassa digunakan sebagai bahan baku untuk menghasilkan bioplastik, pelarut ramah lingkungan, serta berbagai senyawa kimia yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai industri seperti dalam bidang pangan, farmasi, maupun kosmetik. Kedepan potensi pengembangan biomassa semakin besar, terutama pada negara yang memiliki ketersediaan sumber daya hayati melimpah melalui penerapan teknologi yang lebih efisien dan

inovatif seperti biorefinery terpadu. Pengembangan ini tidak hanya meningkatkan pemanfaatan biomassa, tetapi juga dapat menciptakan peluang investasi, lapangan kerja, serta mendukung transisi menuju ekonomi hijau dan kemandirian energi.

E. Potensi Pengembangan Biomassa

Beberapa contoh potensi dari pengolahan biomassa yang telah dikembangkan antara lain:

1. Dalam buku karya Rizka dan Rahmatullah (2023)

membahas tentang pemanfaatan biomassa dari limbah kulit durian menjadi alternatif bahan bakar. Kulit durian mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang menjadi komponen utama biomassa lignoselulosa sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku biofuel dan produk bernilai tambah lainnya. Tingginya kandungan lignin dan selulosa pada biomassa menjadikannya berpotensi untuk diolah menjadi berbagai jenis bahan bakar alternatif melalui proses konversi energi. Kulit durian juga memiliki kandungan polimer fenolik yang berperan sebagai pengikat antarserat pada tumbuhan serta memberikan kekuatan dan kekokohan pada batang (Haryati, Rahmatullah, dan Putri 2018). Kandungan tersebut berpotensi diolah dan dimanfaatkan menjadi

berbagai produk bernilai tambah, seperti biobriket, bio-oil, dan *synthetic natural gas* (SNG).

- a) Biomassa yang berasal dari limbah kulit durian dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar bentuk padat melalui proses torefaksi untuk meningkatkan nilai energi, mengurangi emisi asap, serta menghasilkan bahan bakar yang lebih efisien dan tahan lama saat proses pembakaran.
- b) Limbah kulit durian dapat diolah melalui proses pirolisis menjadi bio-oil yang berpotensi sebagai bahan bakar alternatif, dengan kandungan utama senyawa fenol dan turunannya yang berasal dari lignin.
- c) Kulit durian yang mengandung banyak lignoselulosa berpotensi diolah menjadi *synthetic natural gas* (SNG) melalui proses gasifikasi, dan dapat juga melalui gasifikasi katalitik dengan menggunakan katalis.

2. Dalam penelitian Purwono *et al* (2024)

telah mengolah limbah biomassa dari gergajian kayu jati dan sekam padi menjadi pellet dengan variasi yang telah ditentukan. Pemanfaatan sekam padi secara langsung akan menimbulkan polusi yang besar akibat sebagian besar pembakaran tidak sempurna dan menghasilkan emisi CO₂ yang cukup tinggi, maka dari itu akan lebih efektif jika diolah menjadi bahan bakar dalam bentuk cair atau gas yang bisa terbakar (Rahmadani & Suwandi, 2020). Proses

pembuatan bahan bakar gas dikenal sebagai gasifikasi, sedangkan produksi bahan bakar cair dilakukan melalui proses pirolisis (Narega *et al*, 2022). Metode termogravimetri digunakan untuk mengetahui bahan mana yang paling baik digunakan sebagai bahan biomassa atau bahan bakar alternatif karena memiliki kestabilan termal dan karakteristik pembakaran yang lebih baik.

3. Dalam penelitian Erdiwansyah *et al* (2024)

dimana limbah biomassa dari hasil pengolahan pabrik kelapa sawit dapat diolah menjadi energi padat yang berpotensi digunakan menjadi sumber energi dalam pembangkit listrik tenaga biomassa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bahan bakar yang dihasilkan memiliki potensi energi yang tinggi sehingga dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan batu bara.

4. Dalam penelitian Styani *et al* (2023)

dalam Pemanfaatan limbah kulit singkong, kulit talas, serta sludge dari pengolahan tepung tapioka sebagai bahan pembuatan briket. Hasilnya menunjukkan bahwa walaupun nilai kadar abunya perlu diturunkan, tetapi nilai kadar air dan kalor dari briket yang dihasilkan sudah sesuai dengan standar nasional sehingga berpotensi bermanfaat sebagai bahan bakar alternatif.

F. Dampak Lingkungan dan Keberlanjutan

Dampak lingkungan dan keberlanjutan dari pemanfaatan biomassa sangat signifikan dalam mendukung pengelolaan sumber daya yang lebih ramah lingkungan. Pengolahan limbah biomassa dapat membantu mengurangi penumpukan limbah organik yang berpotensi mencemari tanah, air, dan udara. Selain itu, konversi biomassa menjadi biofuel dan bahan kimia dapat menekan emisi gas rumah kaca karena karbon yang dilepaskan merupakan bagian dari siklus karbon alami, berbeda dengan bahan bakar fosil yang menambah akumulasi karbon di atmosfer. Pemanfaatan biomassa dari limbah menjadi produk yang bernilai dapat meminimalkan pemborosan sumber daya. Dengan pendekatan ini, biomassa selain memberikan manfaat secara ekonomi, juga berkontribusi dalam pengurangan dampak lingkungan dan pemanfaatan sumber daya secara efektif dan efisien.

G. Penutup

Pemanfaatan limbah biomassa untuk produksi biofuel dan bahan kimia bernilai tinggi merupakan salah satu solusi dalam mengatasi permasalahan limbah sekaligus memenuhi kebutuhan energi alternatif yang ramah lingkungan. Berbagai jenis limbah biomassa memiliki potensi besar untuk diolah melalui proses termokimia maupun biokimia menjadi produk yang

bernilai ekonomis serta senyawa kimia penting. Selain mampu mengurangi pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah organik, pemanfaatan biomassa juga dapat mendukung pengembangan energi terbarukan dan meningkatkan nilai tambah sumber daya lokal. Dengan pengelolaan dan pengembangan teknologi yang tepat, limbah biomassa diharapkan dapat menjadi sumber energi dan bahan baku industri yang berkelanjutan di masa depan.

H. Daftar Pustaka

- Andika Prastika, A., dan Muzakhar, S.S.A. (2023). *Analisis Pemanfaatan Limbah Biomassa sebagai Basis Pengembangan Energi Terbarukan di Kabupaten Jember*. J-Proteksion Vol. 8 No.1 Agustus 2023, Hal. 19-29.
- Asyifa, Salwa. (2025). *Strategi Bioproduksi Berkelanjutan Dari Limbah Pertanian: Integrasi Konsep Circular Economy Untuk Minimasi Emisi Dan Nilai Tambah Tinggi*. Jurnal Teknologi Kimia Unimal 14:1 (Mei 2025) 68-77.
- Dady Sulaiman, Siti Maria Ulva, dan Ayu Lingga Ratna Sari. (2025). *Pemanfaatan Biomassa dari Limbah. Prinsip, Teknologi Konversi, dan Inovasi Bioenergi*. Tangerang: Minhaj Pustaka.
- Erdiwansyah, Muhtadin, Gani, A., Faisal, M., Nizar, M., Darnas, Y. (2024). *Konversi Limbah Biomassa Tandan Kosong Sawit menjadi Energi Panas*. Jurnal Serambi Engineering. Volume IX, No.1, Januari 2024.

- Narega, H.S.O., Apriansyah, R., Aswan, A., Fatria, Erlinawati. (2022). *Produksi Syngas Dari Proses Gasifikasi Biomassa Menggunakan Downdraft Gasifier Sebagai Gas Bakar Pada Motor Bakar Empat Tak*. J. Pendidik. dan Teknol. Indones., vol. 2, no. 11, hal. 469–474.
- Nirwanto, Y., Rahmat, B., Hadiyah, I., Mutolib, M. (2025). *Intensifikasi Pemanfaatan Ketersediaan Biomassa Pertanian menjadi Arang untuk Pembenah Tanah, Bahan Bakar dan Industri*. Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal ke-13 Tahun 2025, Palembang 20 Oktober 2025 "Optimalisasi Lahan Suboptimal untuk Mendukung Swasembada Pangan Berkelanjutan".
- Pujotomo, Isworo. (2017). *Potensi Pemanfaatan Biomassa Sekam Padi Untuk Pembangkit Listrik Melalui Teknologi Gasifikasi*. Jurnal Energi & Kelistrikan Vol. 9 No. 2, Juni - Desember 2017.
- Purwono, A.H., Suhartoyo, Kristiono, R., Pradhana, D.H.P. (2024). *Pemanfaatan Limbah Biomassa Sebagai Bahan Bakar Ramah Lingkungan*. Jurnal V-Mac, Vol. 9 No. 1 : 42 – 46.
- Rahmadani, E.R.F., Suwandi. (2020). *Pengaruh Variasi AFR Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Biomassa Tipe Down Draft*. E-Prociding og Engineering, 2020, vol. 7, no. 2, hal. 4391–4399.
- Rizka Wulandari Putri, dan Rahmatulla. (2023). *Proses Pemanfaatan Limbah Biomassa Kulit Durian (Durio zibethinus) Menjadi Alternative Fuel Sebagai Langkah Diversifikasi Energi*. Palembang: Bening Media Publishing.

- Styani, E., Lestari, P.S., Novansyah, T., Priyambada, A. (2023). *Pemanfaatan Limbah Biomassa Kulit Singkong, Talas dan Sludge Limbah Industri Tepung Tapioka sebagai Bahan Baku Briket*. Warta Akab Volume 47, No.2, Desember 2023, PP:50-55
- Sulasminingsih, S., Hafiz, F., Sari, K., Yuninda, S. (2023). *Penggunaan Biomassa sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Wilayah Pedesaan*. Journal of Optimization System and Ergonomy Implementation (JOSEON) Vol. 01 No. 01 May, 2023, 42-51.

PENUTUP

Oleh: Jumriah Nur

Buku Bunga Rampai *Terobosan Terkini Dalam Kimia: Inovasi Material, Energi, Dan Kesehatan Untuk Masa Depan Berkelanjutan* menghadirkan berbagai perspektif dan hasil kajian yang menunjukkan besarnya kontribusi ilmu kimia dalam menjawab tantangan global Abad Ke-21. Melalui pembahasan mengenai Desain Katalis Berbasis *Metal-Organic Frameworks* (Mofs) Untuk Reaksi Kimia Hijau Katalis Hijau, Kimia Bioelektrokimia: Potensi Dalam Bioreaktor Dan Produksi Energi Berbasis Mikroba, Pemanfaatan Biopolimer Cerdas Untuk Kemasan Aktif dan Pengawetan Pangan, Kimia Sensor Fluoresensi dalam Deteksi Polutan dan Biomarker Penyakit, Kimia Bioelektrokimia: Potensi dalam Bioreaktor dan Produksi Energi Berbasis Mikroba dan Pemanfaatan Limbah Biomassa untuk Produksi Biofuel dan Bahan Kimia Bernilai Tinggi, terlihat bahwa ilmu kimia terus berkembang menjadi motor penggerak kemajuan teknologi yang berorientasi pada keberlanjutan.

Seluruh topik yang disajikan dalam buku ini memiliki benang merah yang sama, yaitu upaya mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya melalui pendekatan ilmiah yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan. Inovasi dalam bidang material memungkinkan terciptanya produk dengan kinerja yang lebih baik dan dampak lingkungan yang lebih

rendah. Perkembangan teknologi energi berbasis prinsip kimia memberikan alternatif terhadap ketergantungan pada sumber energi fosil. Sementara itu, aplikasi kimia dalam bidang kesehatan membuka peluang besar dalam meningkatkan kualitas diagnosis, terapi, serta pencegahan penyakit.

Meskipun demikian, berbagai tantangan masih perlu dihadapi, termasuk peningkatan skala produksi teknologi baru, efisiensi biaya, aspek keamanan lingkungan, serta integrasi hasil penelitian ke dalam dunia industri dan masyarakat. Oleh karena itu, penelitian yang berkelanjutan, kolaborasi multidisiplin, dan dukungan berbagai pemangku kepentingan menjadi faktor penting dalam mempercepat implementasi inovasi kimia yang memberikan dampak nyata.

Buku ini diharapkan tidak hanya menjadi sumber informasi dan referensi akademik, tetapi juga menjadi inspirasi bagi pengembangan penelitian dan inovasi di masa mendatang. Semoga berbagai pemikiran dan temuan yang disajikan mampu memperluas wawasan pembaca mengenai peran strategis ilmu kimia dalam pembangunan berkelanjutan serta mendorong lahirnya solusi-solusi baru bagi permasalahan global.

GLOSARIUM

- Aktivasi substrat : Proses peningkatan kereaktifan substrat melalui interaksi dengan situs aktif katalis sehingga lebih mudah bereaksi.
- Asam Brønsted: Situs atau spesies yang mampu mendonorkan proton dalam mekanisme katalitik.
- Asam Lewis : Situs logam atau spesies yang menerima pasangan elektron dari substrat.
- Biokatalisis : Proses katalisis yang melibatkan enzim, baik bebas maupun terimobilisasi dalam MOF.
- Difusi molekul : Pergerakan molekul reaktan atau produk melalui saluran pori material.
- Efisiensi atom : Tingkat pemanfaatan atom pereaksi menjadi produk utama dengan limbah minimal.
- Eksitasi : Keadaan elektron setelah menyerap energi cahaya dan berpindah ke tingkat energi lebih tinggi.
- Fotokatalisis : Reaksi katalitik yang dipicu atau dipercepat oleh cahaya.
- Gugus amina : Gugus fungsi $-NH_2$ yang sering digunakan untuk fungsionalisasi linker organik.

- Gugus fungsional: Bagian molekul tertentu yang menentukan sifat kimia dan reaktivitas senyawa.
- Hidrolisis : Pemutusan ikatan kimia oleh reaksi dengan air.
- Hierarkis :Struktur bertingkat yang menggabungkan lebih dari satu ukuran pori dalam satu material.
- Immobilisasi enzim: Penempatan enzim di dalam pori atau pada permukaan material agar lebih stabil dan dapat digunakan ulang.
- Katalis bifungsional: Katalis yang memiliki dua jenis fungsi aktif, misalnya asam dan basa.
- Kimia hijau : Pendekatan kimia yang menekankan efisiensi, keamanan, dan minimisasi dampak lingkungan.
- Konversi biomassa: Transformasi bahan hayati menjadi bahan bakar atau senyawa bernilai tambah.
- Linker organic : Molekul organik penghubung simpul logam dalam struktur MOF.
- Logam alkali tanah: Unsur golongan alkali tanah seperti Mg, Ca, dan Sr yang digunakan sebagai pusat logam MOF.
- Logam transisi : Unsur blok d seperti Fe, Cu, Ni, dan Co yang banyak digunakan dalam MOF.
- Mass transfer : Perpindahan reaktan dan produk menuju atau dari situs aktif katalis.

Metal–Organic Frameworks (MOFs): Material kristalin berpori yang tersusun dari simpul logam dan linker organik.

Mesopori : Pori berukuran 2–50 nm.

Microwave-assisted synthesis: Metode sintesis menggunakan pemanasan gelombang mikro untuk mempercepat pembentukan MOF.

Mikropori : Pori berukuran kurang dari 2 nm.

Modifikasi pasca sintesis (PSM): Perubahan struktur atau fungsi MOF setelah terbentuk tanpa merusak kerangka utama.

Nukleasi : Tahap awal pembentukan inti kristal saat proses sintesis.

Oksidasi selektif : Reaksi oksidasi yang diarahkan terutama menghasilkan produk tertentu.

Pelarut ramah lingkungan: Pelarut dengan dampak lingkungan lebih rendah, seperti air atau etanol.

Pori hierarkis : Sistem pori bertingkat yang menggabungkan mikropori dan mesopori.

Porositas : Karakteristik jumlah dan distribusi ruang kosong atau pori dalam material.

Post-synthetic modification (PSM): Istilah lain dari modifikasi pasca sintesis.

Prekursor : Bahan awal yang digunakan dalam pembentukan MOF.

Reduksi : Reaksi penambahan elektron atau penurunan bilangan oksidasi.

Selektivitas reaksi: Kemampuan sistem reaksi menghasilkan produk target dibanding produk samping.

Sintesis hijau : Metode sintesis yang mengurangi penggunaan bahan berbahaya, energi, dan limbah.

Situs aktif : Bagian katalis tempat berlangsungnya reaksi kimia.

Soft templating: Pembentukan pori menggunakan surfaktan atau polimer sebagai cetakan sementara.

Solvothermal : Metode sintesis dalam pelarut pada suhu tinggi di sistem tertutup.

Substrat : Molekul pereaksi yang diubah menjadi produk melalui proses katalitik.

Transfer elektron: Perpindahan elektron antarspesies selama reaksi redoks.

Transesterifikasi: Reaksi pertukaran gugus ester yang umum digunakan pada produksi biodiesel.

Ultrasonikasi: Penggunaan gelombang ultrasonik untuk mempercepat proses sintesis atau pembentukan kristal.

BIOGRAFI EDITOR



Penulis lahir di Buttakeke pada Tanggal 05 Oktober 1990. Saat ini, menjabat sebagai dosen tetap pada Program Studi Teknologi Laboratorium Medis Program Diploma Tiga di STIKes Prima Indonesia. Penulis telah menempuh pendidikan Sarjana Biologi di Universitas Hasanuddin Makassar kemudian melanjutkan pendidikan Magister di Program Studi Biologi Universitas Diponegoro Semarang melalui Beasiswa Calon dosen (BU). Kontak dengan Editor dapat melalui E-mail: jumriahnur1234@gmail.com.

BIOGRAFI PENULIS

1. Aisyah, S.Si, M.Si.



Penulis saat ini merupakan dosen di Prodi Kimia UIN Alauddin Makassar. Studi S1 diselesaikan di Universitas Padjadjaran pada tahun 2004 dan S2 di Program Pascasarjana Kimia Institut Teknologi Bandung pada tahun 2011.

Penulis telah menulis beberapa buku ajar seperti Kimia Dasar, Senyawa Organik Monofungsi, Mekanisme Reaksi Senyawa Organik, Teknologi Kimia Bahan Alam dan Minyak Atsiri dalam Praktek Klinis: Panduan Lengkap Penggunaan dan Khasiat. Selain itu penulis juga aktif dalam publikasi artikel di jurnal nasional/internasional dan website Prodi Kimia UIN Alauddin Makassar serta aktif sebagai menjadi pembicara pada beberapa seminar/konferensi internasional.

2. Umami Zahra



Umami Zahra., lahir di Ujung Pandang pada 11 Mei 1990. Saat ini, penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar, kemudian melanjutkan S2 di Institute Pertanian Bogor. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: ummi.zahra@uin-alauddin.ac.id.

3. Arfiani Nur, S.Si.,M.Sc



Arfiani Nur adalah dosen dan peneliti di Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Ia memulai karier akademiknya pada tahun 2016 dan aktif dalam bidang kimia organik termasuk pengembangan sensor kimia. Karya ilmiahnya telah dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi. Fokus penelitiannya meliputi pengembangan sensor berbasis senyawa organik.

Karya Tulis:

- Synthesis and Characterization of Nickel Nanoparticles: Biological and Photocatalytic Properties. *Indonesian Journal of Chemistry* (2025).
- Antibacterial and Antioxidant Activities of *Cutibacterium acnes* on *Jatropha gossypifolia* Leaves and *Pometia pinnata* Bark. *Chimica et Natura Acta* (2025).
- MAE and RSM Optimization on Red Ginger Extraction for Enhancement of β -Sesquiphellandrene and Zingerone in Support of Green Chemistry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2025).

- Sustainable Nickel Recovery from Nickel Slag Waste Using Diethylamine Dithiocarbamate: Enhancing Resource Efficiency and Minimizing Environmental Impact. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology* (2025).
- A Review: Progress and Trend Advantage of Dopamine Electrochemical Sensor. *Journal of Electroanalytical Chemistry* (2024).
- The Advances in the Recovery Process for Precious Metals from Nickel Slag: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2024).
- Acute Toxicity and Lethal Dose (LD50) of Ethyl Acetate Extract of *Clinacanthus nutans* Leaves on Mice Using the Thompson-Weil Method. *Tropical Journal of Natural Product Research* (2024).
- Antibacterial Activity of Natural Product-Based Compounds (various studies on plant extracts and bioactivity).
- Analisa Logam Berat Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Makassar. *Chimica et Natura Acta* (2022).
- Pengujian Kualitas Air Minum Isi Ulang di Samata-Gowa, Sulawesi Selatan. *Dharma Bakti* (2022).
- Antibacterial and Antioxidant Activities of Plant Extracts. *Walisongo Journal of Chemistry* (2022).
- Peluang Hidrogen sebagai Bahan Bakar Alternatif di Indonesia. *Al-Hikmah Journal* (2020).

4. Rina Setyawati, S.Si., M.Pd



Pendidikan lulusan S1 Kimia dari Universitas Sebelas Maret, Surakarta. Lulusan S2 Pendidikan Sains (konsentrasi: Kimia) dari Universitas Sebelas Maret, Surakarta. Bekerja di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan KESOSI Jakarta sebagai Dosen. Email: rinasetya99@gmail.com

Karya Tulis:

- Buku: Dasar-Dasar Kimia Analitik Untuk mahasiswa.
- Buku: Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di Laboratorium Rumah Sakit.
- Buku: Analisis Toksikologi Dan Pemeriksaan Napza.
- Buku: Biokimia Klinik.

SINOPSIS

Buku ***Terobosan Terkini dalam Kimia: Inovasi Material, Energi, dan Kesehatan untuk Masa Depan Berkelanjutan*** menyajikan kumpulan karya ilmiah yang mengulas berbagai perkembangan terbaru dalam ilmu kimia dan aplikasinya di berbagai bidang strategis. Pembahasan dimulai dari pengembangan katalis berbasis *Metal-Organic Frameworks* (MOFs) untuk mendukung reaksi kimia hijau, pemanfaatan sistem bioelektrokimia dalam produksi energi berbasis mikroorganisme, hingga inovasi biopolimer cerdas sebagai kemasan aktif yang mampu meningkatkan keamanan dan kualitas pangan.

Selain itu, buku ini mengupas perkembangan teknologi sensor fluoresensi untuk deteksi polutan lingkungan dan biomarker penyakit, pemanfaatan limbah biomassa menjadi material bernilai tambah, pengembangan material fungsional untuk aplikasi energi dan lingkungan, serta berbagai inovasi kimia yang berkontribusi pada pengembangan teknologi kesehatan modern. Setiap bab disusun berdasarkan kajian ilmiah terkini sehingga memberikan gambaran komprehensif mengenai arah perkembangan riset kimia yang semakin terintegrasi dengan ilmu material, bioteknologi, nanoteknologi, dan rekayasa proses.

Buku ini diharapkan menjadi referensi yang bermanfaat bagi pembaca yang ingin memahami berbagai inovasi terkini dalam ilmu kimia beserta implementasinya dalam menghadapi tantangan masa depan.

BUNGA RAMPAI TEROBOSAN TERKINI DALAM KIMIA:

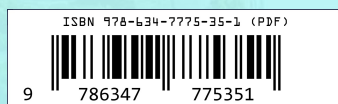
INOVASI MATERIAL, ENERGI, DAN KESEHATAN UNTUK MASA DEPAN
BERKELANJUTAN

Buku *Terobosan Terkini dalam Kimia: Inovasi Material, Energi, dan Kesehatan untuk Masa Depan Berkelanjutan* menyajikan kumpulan karya ilmiah yang mengulas berbagai perkembangan terbaru dalam ilmu kimia dan aplikasinya di berbagai bidang strategis. Pembahasan dimulai dari pengembangan katalis berbasis Metal -Organic Frameworks (MOFs) untuk mendukung reaksi kimia hijau, pemanfaatan sistem bioelektrokimia dalam produksi energi berbasis mikroorganisme, hingga inovasi biopolimer cerdas sebagai kemasan aktif yang mampu meningkatkan keamanan dan kualitas pangan. Selain itu, buku ini mengupas perkembangan teknologi sensor fluoresensi untuk deteksi polutan lingkungan dan biomarker penyakit, pemanfaatan limbah biomassa menjadi material bernilai tambah, pengembangan material fungsional untuk aplikasi energi dan lingkungan, serta berbagai inovasi kimia yang berkontribusi pada pengembangan teknologi kesehatan modern. Setiap bab disusun berdasarkan kajian ilmiah terkini sehingga memberikan gambaran komprehensif mengenai arah perkembangan riset kimia yang semakin terintegrasi dengan ilmu material, bioteknologi, nanoteknologi, dan rekayasa proses. Buku ini diharapkan menjadi referensi yang bermanfaat bagi pembaca yang ingin memahami berbagai inovasi terkini dalam ilmu kimia beserta implementasinya dalam menghadapi tantangan masa depan.



PENERBIT
PT. Mustika Sri Rosadi

Citra Indah City, Bukit Heliconia,
Kecamatan Jonggol, Kabupaten Bogor



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