

Kemajuan Teknologi Membran Adsorpsi Pewarna untuk Pengolahan Air Limbah Berkelanjutan: Tinjauan Material, Mekanisme, Kinerja, dan Arah Riset

Sumiati Side¹, Rini Perdana¹

Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Makassar ^{32,3}

Corresponding Author: sumiati.side@unm.ac.id

ABSTRACT

Pencemaran air limbah oleh pewarna sintesis masih menjadi persoalan lingkungan karena molekul pewarna umumnya bersifat stabil, sulit terdegradasi, dan dapat menurunkan kualitas ekosistem perairan. Artikel review ini bertujuan menganalisis kemajuan teknologi membran adsorpsi pewarna, terutama dari aspek desain material, metode fabrikasi, mekanisme adsorpsi, indikator kinerja, stabilitas penggunaan ulang, dan tantangan implementasi. Metode yang digunakan adalah telaah pustaka berbasis sintesis tematik terhadap studi membran adsorptif berbahan polimer, biopolimer, graphene oxide, metal-organic framework, covalent organic framework, biochar, dan material hibrida lain yang dilaporkan dalam literatur terbaru. Hasil sintesis menunjukkan bahwa peningkatan kinerja membran terutama ditentukan oleh porositas, luas permukaan aktif, muatan permukaan, hidrofilisitas, dan keberadaan gugus fungsional yang mampu membentuk interaksi elektrostatis, ikatan hidrogen, tumpukan pi-pi, pertukaran ion, serta pengayakan ukuran. Membran nanokomposit dan membran fungsional responsif pH memperlihatkan kapasitas adsorpsi, selektivitas dye/salt, regenerasi, dan sifat antifouling yang lebih baik dibanding membran konvensional. Namun, sebagian besar studi masih dilakukan pada larutan model, durasi operasi singkat, dan belum sepenuhnya menguji air limbah nyata. Oleh karena itu, pengembangan membran adsorpsi pewarna selanjutnya perlu diarahkan pada fabrikasi hijau, skalabilitas, uji kontinu jangka panjang, dan evaluasi ekonomi-lingkungan.

KEYWORDS

Membran adsorpsi; pewarna sintesis; nanokomposit; dye/salt separation; air limbah

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v5i4.504>

A. Pendahuluan

Pewarna sintesis digunakan secara luas dalam industri tekstil, kertas, percetakan, makanan, kosmetik, dan berbagai proses manufaktur lain. Penggunaan tersebut menghasilkan air limbah berwarna yang mengandung molekul organik aromatik, garam, surfaktan, agen pembantu proses, dan bahan organik terlarut (Wang et al., 2024). Persoalan utama dari limbah pewarna adalah warna yang kuat pada konsentrasi rendah, stabilitas kimia yang tinggi, serta potensi toksisitas terhadap organisme perairan. Selain mengganggu estetika, keberadaan pewarna dalam badan air dapat menghambat penetrasi cahaya, menurunkan laju fotosintesis, dan memperburuk keseimbangan ekologi. Oleh karena itu, teknologi penghilangan pewarna yang efisien, selektif, dapat diregenerasi, dan ekonomis menjadi kebutuhan penting dalam pengelolaan air limbah berkelanjutan (Zhao et al., 2021).

Metode konvensional seperti koagulasi-flokulasi, oksidasi kimia, biodegradasi, dan adsorpsi serbuk telah banyak digunakan untuk menurunkan kadar pewarna. Namun, pendekatan tersebut sering menghadapi kendala berupa pembentukan lumpur sekunder, kebutuhan bahan kimia dalam jumlah besar, konsumsi energi, kesulitan pemisahan adsorben setelah proses, serta efektivitas yang tidak konsisten pada campuran pewarna dan garam (Moyo et al., 2025; Saleem et al., 2024). Dalam konteks ini, membran adsorpsi menawarkan keunggulan karena menggabungkan fungsi pemisahan fisik dan penangkapan molekul melalui situs aktif pada permukaan atau struktur pori. Membran tidak hanya menyaring partikel dan molekul tertentu, tetapi juga dapat dirancang agar memiliki gugus

fungsi bermuatan, struktur berpori hierarkis, dan permukaan hidrofilik yang mendukung adsorpsi selektif.

Perkembangan terbaru menunjukkan pergeseran desain membran dari membran polimer pasif menuju membran komposit dan fungsional yang lebih adaptif. Material seperti graphene oxide (GO), metal-organic framework (MOF), covalent organic framework (COF), zeolit, biochar, oksida logam, polidopamin, polimer zwitterionik, dan biopolimer telah dipadukan ke dalam matriks polimer untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan ketahanan fouling ([Abdolmaleki et al., 2024](#); [Ndlovu et al., 2023](#); [Neem et al., 2024](#)). Beberapa membran bahkan dirancang responsif terhadap pH sehingga afinitas terhadap pewarna kationik atau anionik dapat diatur sesuai kondisi operasi. Strategi tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan membran adsorpsi tidak hanya ditentukan oleh ukuran pori, tetapi juga oleh kimia permukaan dan kemampuan regenerasi ([Daraei et al., 2023](#); [Loh et al., 2024](#); [Wang, 2011](#)).

Walaupun kemajuan tersebut menjanjikan, masih terdapat beberapa persoalan mendasar yang membatasi penerapan membran adsorpsi pewarna pada skala industri. Pertama, banyak studi melaporkan kinerja sangat tinggi pada larutan pewarna tunggal, tetapi belum menguji matriks air limbah nyata yang mengandung campuran pewarna, garam, minyak, dan bahan organik ([Divya & Jangir, 2023](#); [Kazak et al., 2023](#)). Kedua, kapasitas adsorpsi yang tinggi belum selalu diikuti oleh stabilitas mekanik, kestabilan kimia, dan performa alir kontinu yang memadai. Ketiga, fungsionalisasi membran menggunakan nanomaterial canggih sering melibatkan proses multi-tahap yang sulit direproduksi dan berbiaya tinggi. Keempat, laporan kinerja antarmembran sering sulit dibandingkan karena perbedaan konsentrasi awal, pH, jenis pewarna, mode operasi, dan satuan kapasitas adsorpsi ([Arif et al., 2024](#); [Dissanayake et al., 2023](#)).

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan merancang sintesis review yang menelaah kemajuan teknologi membran adsorpsi pewarna dengan fokus pada empat aspek utama, yaitu desain material dan fabrikasi, mekanisme interaksi antara membran dan pewarna, metrik kinerja serta stabilitas penggunaan ulang, dan arah pengembangan riset. Review ini diharapkan dapat menjadi dasar konseptual bagi peneliti yang ingin mengembangkan membran adsorptif berbasis polimer, biopolimer, atau nanokomposit untuk aplikasi pengolahan air limbah pewarna. Selain itu, artikel ini juga menekankan pentingnya pengujian standar, validasi pada air limbah nyata, dan desain membran yang berorientasi pada keberlanjutan.

B. Metodologi

Artikel ini menggunakan pendekatan review literatur naratif-terstruktur. Fokus telaah diarahkan pada penelitian membran adsorpsi pewarna yang melaporkan data eksperimental terkait jenis material, teknik fabrikasi, kapasitas adsorpsi, selektivitas, mekanisme adsorpsi, performa regenerasi, stabilitas, dan sifat antifouling. Literatur utama yang dianalisis mencakup penelitian terkini pada membran berbasis polimer, membran nanofiber, membran matriks campuran, membran berbasis GO, MOF, COF, biochar, biopolimer, dan oksida logam. Artikel yang hanya membahas adsorben serbuk tanpa integrasi membran tidak dijadikan fokus utama, kecuali jika konsepnya relevan untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi atau potensi modifikasi permukaan.

Strategi penelusuran literatur dikembangkan dari kata kunci utama dye adsorption membrane dan diperluas menjadi beberapa kombinasi istilah, seperti functionalized membrane for dye removal, GO/MOF/COF mixed matrix membrane, zwitterionic membrane for dye/salt separation, nanofibrous adsorptive membrane, dan pH-responsive membrane for cationic and anionic dyes. Penelusuran awal menghasilkan 464 makalah kandidat dan citation chaining menambah 125 artikel sehingga terkumpul 589 kandidat; setelah penilaian relevansi, 585 artikel dinilai relevan dan 327 artikel sangat relevan.

Artikel ini tidak mereproduksi seluruh artikel tersebut, tetapi memilih studi yang paling representatif untuk disintesis berdasarkan kedekatan topik dengan membran adsorpsi pewarna. Seleksi artikel diarahkan pada publikasi yang memuat hubungan antara struktur membran dan performa adsorpsi, terutama studi tahun 2020-2026. Berdasarkan hasil penelusuran awal, artikel kemudian dikelompokkan menurut jenis material dan pendekatan fungsionalisasi, lalu dianalisis secara komparatif menggunakan indikator kapasitas adsorpsi, persentase penolakan atau penghilangan, fluks, selektivitas, jumlah siklus regenerasi, dan kondisi operasi.

Analisis dilakukan secara tematik melalui lima tahap. Tahap pertama adalah identifikasi karakteristik material penyusun membran, termasuk jenis matriks dan pengisi. Tahap kedua adalah sintesis mekanisme adsorpsi yang dilaporkan, seperti interaksi elektrostatik, ikatan hidrogen, tumpukan π - π , pertukaran ion, pengayakan ukuran, dan adsorpsi yang digabungkan dengan degradasi fotokatalitik. Tahap ketiga adalah perbandingan metrik kinerja pada berbagai jenis pewarna kationik dan anionik. Tahap keempat adalah evaluasi stabilitas, regenerasi, dan antifouling. Tahap kelima adalah penyusunan kesenjangan riset dan rekomendasi arah penelitian masa depan.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Perkembangan Material dan Strategi Fabrikasi Membran

Peta literatur menunjukkan bahwa membran adsorpsi pewarna berkembang melalui tiga jalur utama. Jalur pertama adalah modifikasi permukaan membran polimer yang telah mapan, seperti PVDF, PES, PAN, PSf, dan PVA, dengan gugus bermuatan atau lapisan fungsional. Jalur kedua adalah pembuatan membran matriks campuran yang menambahkan nanomaterial aktif seperti GO, MOF, COF, zeolit, oksida logam, atau biochar ke dalam matriks polimer. Jalur ketiga adalah pengembangan membran berbasis biopolimer dan limbah biomassa, misalnya kitosan, alginat, selulosa bakteri, biochar vinasse, dan hidroksiapatit. Ketiga jalur tersebut menunjukkan tujuan yang sama, yaitu memperbesar jumlah situs aktif, memperbaiki hidrofilisitas, meningkatkan porositas, dan memperkuat interaksi antara membran dan molekul pewarna.

Membran nanofiber menjadi salah satu platform yang menonjol karena memiliki luas permukaan tinggi, pori saling terhubung, dan jarak difusi pendek. [Wan et al., \(2025\)](#) melaporkan membran nanofibrosa dengan gugus sulfonat dan amonium yang mampu mengadsorpsi pewarna kationik dan anionik secara dua arah. [Gao et al., \(2024\)](#) menunjukkan bahwa membran nanofibrosa komposit natrium alginat/CuO dapat mencapai kapasitas adsorpsi tinggi untuk metilen biru. Sementara itu, [Arif et al., \(2024\)](#) mengembangkan membran nanofiber zeolit-PAN/PVDF yang selektif terhadap pewarna kationik melalui kombinasi tarikan elektrostatik dan pengaruh struktur pori. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa morfologi nanofiber memberikan keuntungan kinetik yang penting, terutama untuk proses alir kontinu.

Pada kelompok membran matriks campuran, penggabungan MOF dan COF memberikan peningkatan kapasitas, selektivitas, dan stabilitas karena material tersebut memiliki pori teratur, luas permukaan tinggi, dan situs kimia yang dapat ditargetkan. [Neem et al. \(2024\)](#) melaporkan penggunaan ionic covalent organic framework dalam membran matriks campuran polisulfon untuk pemisahan polutan bermuatan. [Maru et al. \(2024\)](#) memanfaatkan MOF dalam membran PVDF untuk meningkatkan penghilangan metilen biru dan selektivitas filtrasi. [Liu et al. \(2024\)](#) menunjukkan membran COF tiga dimensi ultra-tipis yang memberikan penolakan tinggi terhadap pewarna kationik dan fluks air tinggi. Walaupun performanya menjanjikan, tantangan utama kelompok ini adalah kompleksitas sintesis dan potensi hambatan skala produksi.

GO dan turunannya juga sering digunakan karena memiliki gugus oksigen, bidang aromatik, dan struktur lembaran yang mendukung adsorpsi pewarna. [Ndlovu et al. \(2023\)](#) memperlihatkan bahwa membran PVDF dengan GO terangkai beta-siklodekstrin efektif untuk menghilangkan Congo Red dan methyl orange. Gbur et al. (2022) menunjukkan bahwa deposisi PVA dan GO pada membran PES meningkatkan penghilangan pewarna dan pemulihan fluks. [Neves et al. \(2022\)](#) menekankan peran ikatan hidrogen, tumpukan pi-pi, dan interaksi elektrostatik pada membran PAN termodifikasi GO-safranin. Namun, stabilitas antarlembar GO dan kemungkinan pelepasan nanomaterial perlu mendapat perhatian dalam desain membran yang aman dan tahan lama.

TABEL 1 Ringkasan desain material dan kinerja membran adsorpsi pewarna yang dilaporkan dalam literatur

Kelompok material	Contoh studi	Strategi utama	Kinerja utama	Catatan kritis
Nanofiber bermuatan	Wan et al. (2025); Gao et al. (2024); Arif et al. (2024)	Elektrospinning, grafting sulfonat/amonium, komposit alginat-CuO, zeolit-PAN/PVDF	541-875 mg/g; 1633,4 mg/g MB; penolakan 100% pewarna kationik	Kinetika cepat dan luas permukaan tinggi, tetapi perlu validasi air limbah nyata.
MOF/COF dan MMM	Moyo et al. (2025); Neem et al. (2024); Maru et al. (2024); Liu et al. (2024)	MOF/COF dalam PES, PVDF, PSf; polimerisasi antarmuka; inversi fase	98% adsorpsi-degradasi MO; 316,3 mg/g CR; penolakan sekitar 97%	Selektivitas tinggi, namun sintesis dan reproduktibilitas menjadi tantangan.
GO dan membran karbon	Abdolmaleki et al. (2024); Ndlovu et al. (2023); Gbur et al. (2022); Neves et al. (2022)	GO difungsikan, PVA/GO, GO-beta-CD, GO-safranin	>99% penghilangan beberapa pewarna; pemulihan fluks sekitar 80%	Interaksi pi-pi kuat; perlu kontrol leaching dan kestabilan antarlembar.
Biopolimer dan biomassa	Dissanayake et al. (2023); Kazak et al. (2023); Zeynali et al. (2023); Saleem et al. (2024)	Kitosan-GO, biochar vinasse, kitosan/PVA/HAp, polietilen limbah-CaCO ₃	182,5-491 mg/g; >99% MB; 97% efisiensi setelah regenerasi	Ramah lingkungan dan murah, tetapi kekuatan mekanik perlu diperkuat.
Responsif pH/zwitterionik	Daraei et al. (2023); Loh et al. (2024); Ibrahim et al. (2024); Wang et al. (2024)	Aditif peka pH, polimer zwitterionik, polidopamin, amidoksim	97-100% penghilangan; 444,2 mg/g MB; sekitar 99% pemulihan selektif	Menjanjikan untuk campuran pewarna, namun sensitif terhadap variasi matriks.
Adsorpsi-fotokatalitik	Jamilon et al. (2024); Zhao et al. (2021); Moyo et al. (2025)	PVDF/TiO ₂ /GO, MOF porfirin, aktivasi persulfat	Degradasi MB 91,89%; peningkatan regenerasi dan self-cleaning	Efektif untuk fouling, tetapi membutuhkan energi/oksidator dan kontrol produk samping.

2. *Mekanisme Adsorpsi dan Selektivitas Pewarna*

Mekanisme adsorpsi pada membran adsorptif tidak bersifat tunggal, melainkan hasil kombinasi antara sifat permukaan membran, struktur pori, jenis pewarna, pH, kekuatan ionik, dan komposisi matriks air limbah. Interaksi elektrostatis merupakan mekanisme paling dominan ketika membran bermuatan negatif berinteraksi dengan pewarna kationik atau membran bermuatan positif berinteraksi dengan pewarna anionik. Pengaturan muatan dapat dilakukan melalui sulfonasi, aminasi, kuaternisasi, ko-deposisi polidopamin, atau integrasi polimer zwitterionik. Oleh karena itu, pH larutan menjadi parameter penting karena dapat mengubah derajat ionisasi gugus fungsi pada membran dan pewarna.

Selain elektrostatis, tumpukan π - π berperan besar pada membran yang mengandung GO, biochar, aromatik COF, atau MOF dengan ligan aromatik. Molekul pewarna banyak memiliki cincin aromatik sehingga dapat berinteraksi dengan domain karbon atau kerangka organik pada membran. Ikatan hidrogen juga sering dilaporkan pada membran yang kaya gugus hidroksil, amina, karboksil, atau amida, seperti kitosan, PVA, alginat, selulosa, dan GO. Kombinasi antara tumpukan π - π dan ikatan hidrogen menjelaskan mengapa beberapa membran biopolimer-GO mampu menangkap pewarna kationik dan anionik secara simultan ([Dissanayake et al., 2023](#); [Neves et al., 2022](#); [Ndlovu et al., 2023](#)).

Pada membran berbasis MOF dan COF, selektivitas tidak hanya ditentukan oleh muatan, tetapi juga oleh pengayakan ukuran dan kesesuaian geometri molekul. [Liu et al. \(2024\)](#) dan [Miao et al. \(2023\)](#) menekankan pentingnya saluran pori teratur dalam pemisahan dye/salt, yaitu garam kecil dapat melewati membran sedangkan molekul pewarna yang lebih besar tertahan atau teradsorpsi. Pada membran responsif pH, perubahan muatan permukaan memungkinkan pergantian afinitas terhadap pewarna tertentu sehingga pemisahan campuran methyl orange dan rhodamine B dapat dilakukan secara lebih selektif ([Wang et al., 2024](#)). Konsep ini penting karena air limbah nyata umumnya tidak mengandung satu jenis pewarna saja.

Sebagian studi mengombinasikan adsorpsi dengan degradasi, misalnya melalui TiO₂/GO, MOF fotokatalitik, atau aktivasi persulfat. Pendekatan ini menarik karena adsorpsi saja berpotensi memindahkan polutan dari fase air ke membran tanpa menghancurkan struktur pewarna. Dengan fotokatalisis atau oksidasi radikal, molekul pewarna yang teradsorpsi dapat didegradasi sehingga situs aktif membran lebih mudah pulih. Namun, integrasi proses degradasi perlu dievaluasi secara hati-hati agar tidak menghasilkan produk antara yang lebih toksik, meningkatkan biaya energi, atau mempercepat kerusakan membran.

3. *Kinerja Adsorpsi*

Kinerja membran adsorpsi biasanya dilaporkan melalui kapasitas adsorpsi, persentase penghilangan, penolakan membran, fluks, selektivitas dye/salt, dan jumlah siklus regenerasi. Kapasitas adsorpsi tinggi tidak selalu menunjukkan performa terbaik jika fluks rendah, waktu kontak terlalu lama, atau regenerasi tidak efisien. Sebaliknya, penolakan pewarna yang tinggi pada mode filtrasi perlu dipertimbangkan bersama potensi fouling dan penurunan fluks. Oleh karena itu, evaluasi membran adsorpsi sebaiknya tidak hanya berfokus pada satu parameter, tetapi menggunakan matriks indikator yang mewakili efisiensi, stabilitas, dan kelayakan operasional.

Beberapa studi menunjukkan kapasitas adsorpsi yang sangat tinggi, terutama pada membran nanofiber dan membran komposit berpori. [Gao et al. \(2024\)](#) melaporkan kapasitas hingga 1633,4 mg/g untuk metilen biru pada membran nanofibrosa alginat/CuO, sedangkan [Wan et al. \(2025\)](#) melaporkan kapasitas 541-875 mg/g untuk membran nanofibrosa bermuatan yang dapat menangkap pewarna kationik dan anionik. [Zeynali et al. \(2023\)](#) juga melaporkan kapasitas 491 mg/g untuk Congo Red pada membran kitosan/PVA/hidroksiapatit. Angka-angka tersebut menunjukkan potensi besar

membran adsorptif, tetapi perlu dibandingkan dalam kondisi operasi yang setara, terutama konsentrasi awal, pH, dosis membran, laju alir, dan komposisi garam.

Regenerasi dan penggunaan kembali menjadi aspek penting karena membran yang tidak dapat diregenerasi akan menghasilkan biaya operasi tinggi dan limbah padat sekunder. Sejumlah membran mempertahankan performa setelah 4-10 siklus, misalnya membran nanofibrosa bermuatan, membran GO/PAN, membran biochar, dan membran COF ([Kazak et al., 2023](#); [Neves et al., 2022](#); [Wang et al., 2022](#); [Wan et al., 2025](#)). Akan tetapi, banyak laporan regenerasi masih dilakukan dalam skala batch dan durasi singkat. Untuk aplikasi industri, membran perlu diuji pada mode alir kontinu dengan siklus adsorpsi-desorpsi berulang, serta dievaluasi terhadap perubahan kekuatan mekanik, leaching pengisi, dan penurunan kapasitas actual.

Fouling merupakan tantangan utama pada membran karena dapat menurunkan fluks, menutup situs aktif, dan memperpendek umur pakai. Strategi antifouling yang banyak digunakan meliputi peningkatan hidrofilisitas, modifikasi muatan permukaan, penggunaan polimer zwitterionik, penambahan polidopamin, serta integrasi fotokatalis untuk efek self-cleaning. [Abdolmaleki et al. \(2024\)](#) menunjukkan bahwa kombinasi PES tersulfonasi dan GO termodifikasi dapat meningkatkan hidrofilisitas, kekuatan mekanik, dan sifat antifouling. [Dai et al. \(2024\)](#) dan [Wang et al. \(2024\)](#) memperlihatkan bahwa lapisan zwitterionik atau polidopamin dapat menurunkan fouling pada pemisahan dye/salt. Meskipun demikian, uji antifouling perlu diperluas pada air limbah nyata yang mengandung protein, minyak, surfaktan, garam tinggi, dan partikel tersuspensi.

4. Kesenjangan Riset dan Arah Pengembangan

Sintesis literatur memperlihatkan bahwa pengembangan membran adsorpsi pewarna telah menghasilkan banyak inovasi material, tetapi masih terdapat jarak antara performa laboratorium dan kesiapan aplikasi. Kesenjangan tersebut terutama berkaitan dengan stabilitas jangka panjang, fouling, validasi air limbah nyata, reproduktibilitas fabrikasi, standardisasi pengujian, serta keberlanjutan ekonomi dan lingkungan. Ringkasan kesenjangan dan arah riset disajikan pada Tabel 2

TABEL 2 Kesenjangan utama dan rekomendasi arah riset membran adsorpsi pewarna

Kesenjangan	Temuan utama	Risiko aplikasi	Arah pengembangan
Uji jangka panjang	Banyak membran diuji hanya beberapa siklus dan pada larutan model.	Umur pakai dan biaya penggantian sulit diprediksi.	Uji kontinu >100 jam, siklus adsorpsi-desorpsi berulang, dan evaluasi mekanik.
Fouling kompleks	Antifouling sering diuji dengan model sederhana.	Fluks menurun pada air limbah nyata.	Uji dengan minyak, surfaktan, garam tinggi, protein, dan organik alami.
Skalabilitas fabrikasi	MOF/COF/GO sering membutuhkan sintesis multi-tahap.	Biaya tinggi dan variasi batch.	Fabrikasi satu langkah, bahan lokal, pelarut hijau, dan kontrol kualitas.
Standarisasi metrik	Kapasitas, fluks, pH, dan konsentrasi awal berbeda antarstudi.	Perbandingan performa menjadi bias.	Protokol uji standar untuk dye/salt mixture, fluks, regenerasi, dan leaching.
Keberlanjutan	Kinerja teknis sering belum dikaitkan dengan biaya dan dampak lingkungan.	Sulit diterima industri.	Life cycle assessment, analisis biaya, keselamatan nanomaterial, dan regenerasi rendah limbah.

Arah riset yang paling mendesak adalah pengembangan membran adsorpsi yang mampu bekerja pada sistem multikomponen. Air limbah industri jarang hanya mengandung satu pewarna, sehingga membran perlu diuji terhadap campuran pewarna kationik, anionik, netral, garam, surfaktan, minyak, dan bahan organik. Dalam konteks ini, membran responsif pH, zwitterionik, dan MOF/COF berpori teratur memiliki peluang besar karena dapat menggabungkan pengaturan muatan dan pengayakan ukuran. Namun, pengaturan tersebut harus dibuktikan pada kondisi operasi yang relevan dengan industri, bukan hanya pada larutan sintetik sederhana.

Arah berikutnya adalah pemilihan bahan yang lebih berkelanjutan. Biopolimer seperti kitosan, selulosa, PVA, alginat, dan bahan berbasis limbah biomassa dapat menjadi alternatif untuk menurunkan biaya dan jejak lingkungan. Penggunaan biochar, zeolit alam, kalsium karbonat dari limbah cangkang, atau hidroksiapatit juga dapat mendukung prinsip ekonomi sirkular. Akan tetapi, bahan alami umumnya memerlukan penguatan struktur, ikatan silang, atau komposit dengan pengisi tertentu agar stabil dalam air dan tahan terhadap tekanan hidrodinamik. Dengan demikian, riset masa depan perlu menyeimbangkan performa tinggi dan kesederhanaan proses fabrikasi.

Dari perspektif aplikasi, membran adsorpsi pewarna perlu bergerak menuju desain modul. Membran lembaran datar, hollow fiber, atau nanofiber mat dapat diuji dalam sistem filtrasi alir kontinu dengan kontrol laju alir dan tekanan. Kinerja perlu dilaporkan bukan hanya sebagai kapasitas adsorpsi mg/g, tetapi juga sebagai volume air terolah per luas membran, perubahan fluks terhadap waktu, efisiensi regenerasi, dan kualitas permeat. Pelaporan ini akan membantu peneliti dan praktisi membandingkan teknologi membran secara lebih objektif dan mempersiapkan validasi skala pilot

D. Kesimpulan

Teknologi membran adsorpsi pewarna menunjukkan kemajuan signifikan melalui pengembangan membran polimer termodifikasi, membran nanofiber, membran matriks campuran, serta membran berbasis GO, MOF, COF, biopolimer, biochar, dan material responsif pH. Kinerja tinggi umumnya dicapai melalui peningkatan porositas, luas permukaan, hidrofilisitas, dan kepadatan gugus fungsi yang memfasilitasi interaksi elektrostatis, ikatan hidrogen, tumpukan pi-pi, pertukaran ion, dan pengayakan ukuran. Membran nanokomposit terbukti mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi, selektivitas pewarna, stabilitas penggunaan ulang, dan sifat antifouling. Namun, terdapat kesenjangan penting berupa dominasi pengujian pada larutan model, durasi operasi yang masih pendek, keterbatasan validasi air limbah nyata, risiko fouling, serta persoalan skalabilitas dan biaya fabrikasi. Oleh karena itu, riset berikutnya perlu diarahkan pada membran yang sederhana dibuat, stabil, dapat diregenerasi, rendah limbah, dan diuji dalam sistem alir kontinu pada matriks limbah realistis. Pendekatan tersebut akan memperkuat kontribusi membran adsorpsi sebagai teknologi pengolahan air limbah pewarna yang efisien dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Abdelhamid, A. E., El-Sayed, A. A., & Khalil, A. M. (2024). Polysulfone nanofiltration membranes enriched with functionalized graphene oxide for dye removal from wastewater. <https://doi.org/10.60692/pd91w-jb702>
- Abdolmaleki, A., Mohamadi, Z., Fashandi, H., & Bazayr, Z. (2024). Synergistic contribution of sulfonated poly(ether sulfone) and iminodiacetic acid functionalized-graphene oxide nanosheets towards enhancing cationic dye wastewater purification using nanocomposite membranes. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148622>

- Arif, M. F., Muhtar, S. A., Siburian, C., Marpaung, K. D. P., Yulianto, N., Abdi, F. F., Taher, T., Wasisto, H. S., & Rianjanu, A. (2024). Zeolite-PAN/PVDF composite nanofiber membranes for highly efficient and selective removal of cationic dyes from wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100806. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100806>
- Dai, F., Qian, G., Ke, Z., Xu, K., Wang, M., Li, D., Deng, Z., Yu, Y., & Chen, C. (2024). Antifouling polyphenylene sulfone tight-ultrafiltration membrane by co-depositing dopamine and zwitterionic polymer for efficient dye/salt separation. *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127403>
- Dai, J., Fang, Y., Xu, Z., Pandaya, D., Liang, J., Yan, H., & Tang, Y. (2023). Robust covalent organic frameworks membranes for ultrafast dye/salt separation in harsh environments. *Desalination*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117025>
- Daraei, P., Rostami, E., Nasirmanesh, F., & Nobakht, V. (2023). Preparation of pH-sensitive composite polyethersulfone membranes embedded by Ag(I) coordination polymer for the removal of cationic and anionic dyes. *Journal of Environmental Management*, 347, 119083. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119083>
- Dissanayake, N. S. L., Pathirana, M. A., Wanasekara, N. D., Mahltig, B., & Nandasiri, G. K. (2023). Removal of methylene blue and Congo red using a chitosan-graphene oxide-electrosprayed functionalized polymeric nanofiber membrane. *Nanomaterials*, 13(8), 1350. <https://doi.org/10.3390/nano13081350>
- Divya, & Jangir, R. (2023). COF-molecular sieving membrane fabrication and applications for dye separation. *ChemistrySelect*. <https://doi.org/10.1002/slct.202302060>
- Gao, J., Wang, X., & Lou, T. (2024). Electrospinning of sodium alginate/copper oxide nanofibrous composite membrane and its application of cationic dye adsorption. *ChemistrySelect*, 9(41). <https://doi.org/10.1002/slct.202403490>
- Gbur, G., Januário, E. F. D., Vidovix, T. B., Calsavara, M. A., Bergamasco, R., & Vieira, A. M. S. (2022). Membrane surface functionalization by the deposition of polyvinyl alcohol and graphene oxide for dyes removal and treatment of a simulated wastewater. *Chemical Engineering and Processing*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108725>
- Ibrahim, G. S., Isloor, A. M., Inamuddin, Asiri, A. M., Ismail, N., Ismail, A., & Ashraf, G. M. (2024). Novel, one-step synthesis of zwitterionic polymer nanoparticles via distillation-precipitation polymerization and its application for dye removal membrane. <https://doi.org/10.60692/mb0aa-zr851>
- Jamilon, S. N. A., Bakar, S. A., Mohamed, A., Muqoyyanah, M., Mohamat, R., & Htwe, Y. (2024). Incorporation of graphene oxide/metal oxide into modified polyvinylidene fluoride membrane for the degradation of methylene blue dye through adsorption-photocatalytic activity. *EDUCATUM*, 11(1), 88-100. <https://doi.org/10.37134/ejsmt.vol11.1.9.2024>

- Kazak, O., Akkaya, G. K., & Tor, A. (2023). Sustainable and efficient removal of cationic, anionic and neutral dyes from water by pre-deposited vinasse biochar membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110042. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110042>
- Li, Y., Xu, C., Gao, Y., Zhu, Y., Wang, H., Wang, C., & Feng, Y. (2024). Preparation of high performance membrane via one-step polymerization and co-deposition of polydopamine/zwitterionic monomers/poly(ethylene glycol) diacrylate. *Polymer*. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126736>
- Liu, X., Wang, J., Shang, Y., Yavuz, C. T., & Khashab, N. M. (2024). Ionic covalent organic framework-based membranes for selective and highly permeable molecular sieving. *Journal of the American Chemical Society*. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c11542>
- Liu, Y., Zhang, M., Xiao, T., & Du, X. (2024). Preparation of self-standing ultra-thin three-dimensional covalent organic frameworks by interfacial polymerization for dye separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112711>
- Liu, Y., Zhao, S., Xu, C., Huang, J., & Guo, Z. (2025). Construction of ZIF-8 composited hydrogel coated PVDF membrane with durable superhydrophilicity and dyes adsorption properties for efficient separation of emulsified and dyed wastewater. *Separation and Purification Technology*, 353, 128299. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128299>
- Loh, C. Y., Burrows, A. D., Zhang, X., & Xie, M. (2024). Polymer of intrinsic microporosity enabled pH-responsive adsorptive membrane: Selectivity and mechanism. *ACS Applied Engineering Materials*, 2(2), 404-414. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.3c00715>
- Maru, K., Kalla, S., & Jangir, R. (2024). Efficient dye extraction from wastewater using indium-MOF-immobilized polyvinylidene fluoride membranes with selective filtration for enhanced remediation. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00194>
- Miao, Q., Wang, Y., Chen, D., Cao, N., & Pang, J. (2023). Development of novel ionic covalent organic frameworks composite nanofiltration membranes for dye/salt separation. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133049>
- Moyo, S., Kock, L. A. D., Gumbi, N. N., & Nxumalo, E. N. (2025). Mechanistic issues relating to amine functionalized nanocellulose-metal organic framework PES/PLA membranes for methyl orange dye removal: Coupling adsorption and persulfate activation. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.57768>
- Neem, M., Mondal, M., Pillai, R. S., & Neogi, S. (2024). Trifunctionalized ionic covalent organic framework-engineered mixed-matrix membranes for rapid and high-performance adsorptive separation of charged aqua pollutants. *ACS Applied Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.4c00363>
- Ndlovu, L. N., Mokubung, K., Donga, C., Gumbi, N. N., Mishra, A. K., Nxumalo, E. N., & Mishra, S. B. (2023). Dual-functional polyvinylidene fluoride beta cyclodextrin-grafted graphene oxide

- mixed matrix membranes for removal of anionic azo dyes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02961-w>
- Neves, T. D. F., Camparotto, N. G., Brião, G., Mastelaro, V. R., Dantas, R. F., Vieira, M. G. A., & Prediger, P. (2022). Graphene oxide-safranin modified@polyacrylonitrile membranes for water purification: Reuse and mechanism based on theoretical calculations and XPS analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103248. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103248>
- Saleem, J., Moghal, Z. K. B., Pradhan, S., Hafeez, A., Shoaib, M., Alahmad, J., & McKay, G. (2024). Adsorbent-embedded polymeric membranes for efficient dye-water treatment. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym16111459>
- Wan, H., Zhu, X., Wang, J., Cao, F., Zhang, Y., Yao, Z., Wang, S., Bhattacharyya, D., & Tang, K. (2025). Adsorptive nanofibrous membranes for bidirectional removal of cationic and anionic dyes. *Separation and Purification Technology*, 131515. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131515>
- Wang, C., Huang, Y., Chang, C., & Peng, N. (2024). pH-triggered polydopamine-decorated nanocellulose membranes for continuously selective separation of organic dyes. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130766>
- Wang, S., & Chang, Y. (2022). Removal of ionic dyes by nanofiber membrane functionalized with chitosan and egg white proteins: Membrane preparation and adsorption efficiency. *Membranes*, 12(1), 63. <https://doi.org/10.3390/membranes12010063>
- Wang, Z., Guan, M., Yang, X., Li, H., Zhao, Y., & Chen, Y. (2023). A trifecta membrane modified by multifunctional superhydrophilic coating for oil/water separation and simultaneous absorption of dyes and heavy metal. *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125904>
- Zeynali, V., Mousavi, S. M., Saljoughi, E., Kiani, S., & Sillanpää, M. (2023). Chitosan/polyvinyl alcohol/hydroxyapatite nanocomposite membrane for the efficient adsorption of Congo red anionic dye. *Polymer Composites*, 44(7), 4227-4242. <https://doi.org/10.1002/pc.27393>
- Zhao, P., Wang, J., Han, X., Liu, J., Zhang, Y., & Bruggen, B. V. D. (2021). Zr-porphyrin metal-organic framework-based photocatalytic self-cleaning membranes for efficient dye removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(4), 1850-1858. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.0C05583>