

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Polusi atau pencemaran air merupakan salah satu tantangan lingkungan paling krusial dihadapi industri global saat ini (R. Singh *dkk.*, 2022). Air bersih yang merupakan elemen fundamental dalam menyokong keberlanjutan sumber daya alam dan seluruh kehidupan, kini terancam oleh kontaminasi dari berbagai hasil aktivitas manusia (Onyedikachi dan Mukah, 2024). Tercatat permasalahan pencemaran air ini telah mengancam sebesar 785 juta jiwa secara serius yang diakibatkan dari peningkatan polutan industri mulai masuk ke saluran air bersih masyarakat sekitar (Salman *dkk.*, 2024).

Dari berbagai polutan yang mencemari air, limbah cair yang mengandung zat warna merupakan salah satu kontributor terbesar dan paling sulit ditangani. Pada periode yang memberikan ruang pesat untuk pertumbuhan industrialisasi, sektor yang erat kaitannya dengan produk atau barang konsumsi (*consumer goods*) layaknya industri tekstil, cat, kosmetik, makanan, dan lainnya menjadi faktor pokok akan meningkatnya skala persoalan polusi ini (Islam *dkk.*, 2023). Zat warna sintetis menjadi pilihan paling diminati dalam penggunaan skala besar terutama untuk memenuhi permintaan pasar seiring meningkatnya populasi dan kebutuhan masyarakat (R. Singh *dkk.*, 2022). Sayangnya, zat warna sintetis berisiko memberikan konsekuensi serius bagi lingkungan dan masyarakat apabila limbah yang mengandung zat tersebut tidak diolah dengan baik (Anwar *dkk.*, 2024). Terlebih lagi hampir seluruh limbah zat warna memiliki sifat karsinogenik,

beracun, dan berpotensi memicu penyakit kronis apalagi untuk yang terpapar dan melakukan kontak berlebihan (Ramamurthy *dkk.*, 2024).

Di antara berbagai jenis zat warna yang umum digunakan, Naphthol Blue Black (NBB) menjadi perhatian khusus karena penggunaannya yang luas dalam industri tekstil dan kosmetik serta keberadaannya yang dominan pada limbah cair industri (Lin *dkk.*, 2023). Pewarna berbasis azo ini tidak mampu mengalami biodegradasi secara alami, mengharuskan dilakukan pengolahan air limbah secara intensif agar dipastikan tidak memberikan tekanan ekologis ke alam ketika di-*release* kembali (Selvaraj *dkk.*, 2021). Karakteristik NBB yang sulit terdegradasi secara biologis menuntut adanya teknologi pengolahan limbah yang lebih inovatif dan efektif.

Salah satu teknologi yang berkembang pesat adalah penggunaan membran sebagai media filtrasi limbah air. Membran filtrasi diminati karena sifat unggulnya, seperti kemampuan selektif untuk memisahkan zat warna dari air secara efisien, ramah lingkungan untuk pemakaian berkelanjutan, dapat disesuaikan dengan berbagai kondisi, serta berbiaya relatif terjangkau (Cevallos-Mendoza *dkk.*, 2022). Oleh karena itu, membran menjadi salah satu fokus utama dalam riset pengolahan limbah zat warna.

Dari berbagai material yang dikembangkan untuk teknologi membran, grafena oksida (GO) merupakan kandidat yang menjanjikan. Struktur dua dimensi dengan gugus fungsi kaya oksigen memberikan kemampuan pemisahan yang baik, sehingga GO banyak digunakan sebagai komposit dalam membran (Tao *dkk.*, 2025). GO umumnya dikombinasikan dengan PVA (Polivinil Alkohol) sebagai

bahan matriks dalam membran yang dapat meningkatkan permeabilitas, kekuatan mekanik, serta kemudahannya untuk disandingkan dengan GO dan material lain sesuai kebutuhan sampel pada penelitian (Ghaffar *dkk.*, 2019; Torkian dan Malekpour, 2025). Namun demikian, permasalahan yang menjadi tantangan pengembangan membran GO dan PVA saat ini adalah *fouling*, penumpukan senyawa filtrasi, yang membuat membran menjadi media filtrasi sekali pakai (Hube *dkk.*, 2021). Selebihnya akan terjadi penurunan performa rejeksi secara drastis sehingga tidak relevan lagi untuk dipakai berkepanjangan (Aronu *dkk.*, 2019).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, perhatian beralih pada material dengan kemampuan katalitik dan self-cleaning, yaitu *Metal-Organic Framework* (MOF). MOF adalah struktur polimer koordinasi yang terbentuk dari ion logam dan ligan organik, membentuk kerangka kristalin berpori dengan luas permukaan tinggi (Camarillo-Martínez *dkk.*, 2025). Kerangka kristalin ini sangat umum untuk memiliki karakteristik permukaan area dan porositasnya yang besar, membuat mereka dapat mengabsorpsi polutan atau limbah (Saeed *dkk.*, 2020). Kemampuan katalitiknya sendiri berpotensi untuk menjadi agen *self-cleaning* dalam membran agar *sustain* untuk pemakaian jangka panjang dan berulang (J. He *dkk.*, 2024). B. Xiang *dkk.* (2024) melakukan fabrikasi PVA, GO, dan MOF UiO-66-NH₂ untuk pemisahan air dengan limbah minyak dan memberikan hasil performa *self-cleaning* 99,9% selama 50 menit. Sayangnya belum ada penelitian yang mendalami pemakaian kombinasi PVA, GO, dan MOF ke dalam sistem membran filtrasi zat warna.

IRMOF-1 merupakan salah satu dari varian MOF yang berpotensi melakukan *self-cleaning* dari kemampuan fotokatalitiknya serta untuk pemisahan zat warna yang menunjukan performa efisiensi adsorpsi zat warna sebesar 77,9% pada temuan Hasan Harahsheh *dkk.* (2024) dari kombinasi IRMOF-1 dengan CFA (*coal fly ash*). Akan tetapi, ketidakstabilan IRMOF-1 dalam air yang membentuk fasa MOF-5W memudahkan terjadinya degradasi menjadi ZTDH (*zinc terephthalate dihydrate*) dan tidak kompatibel untuk kontak lama dengan air (Rodríguez *dkk.*, 2015). Ketidakstabilan IRMOF-1 dalam air ini bisa dimodifikasi dengan NH_2 sebagaimana modifikasi MOF lain yang menjadi stabil di air secara signifikan ketika dilakukan penyisipan NH_2 di dalam kerangka MOF tersebut. IRMOF-3 adalah hasil dari penyisipan NH_2 kedalam kerangka IRMOF-1, menjadikannya stabil dalam air (Gómez-Avilés *dkk.*, 2020; Jasuja *dkk.*, 2012).

Berdasarkan hasil positif dari penggunaan PVA, GO, dan MOF dalam filtrasi limbah cair, penelitian ini difokuskan pada pengembangan membran berbasis PVA/GO/IRMOF-3 untuk aplikasi filtrasi tangential flow filtration (TFF) dalam pemisahan zat warna NBB. Dengan inkorporasi IRMOF-3 dalam membran, penelitian ini meninjau efek penambahan IRMOF-3 pada membran GO dalam menjaga performa rejeksi setiap siklus dengan kemampuan *self-cleaning* yang dimilikinya

I.2 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan membran GO, PVA/GO, dan PVA/GO/IRMOF-3.
2. Menentukan pengaruh penambahan IRMOF-3 terkait karakteristik membran.

3. Menentukan pengaruh penambahan IRMOF-3 dalam membran terhadap performa kestabilan nilai rejeksi dari kemampuan *self-cleaning* membran.