

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

MXene merupakan material yang terbentuk dari hasil *etching* lapisan A berupa unsur golongan IIIA/IVA pada fase MAX. Pada fase MAX, M adalah logam transisi, A adalah unsur golongan IIIA/IVA, dan X adalah unsur C/N. Komposisi kimia dari fase MAX yang ter-*etching* dinyatakan dalam M_n+1X_n ($n=1,2,3$) (Cao *dkk.*, 2018, Li *dkk.*, 2019a). Salah satu jenis MXene yang banyak diteliti adalah $Ti_3C_2T_x$ di mana T_x mewakili gugus fungsi terminal permukaan (-OH, -O, -F, dan lain-lain) yang dihasilkan oleh *etching* Ti_3AlC_2 (Bai *dkk.*, 2021, Li *dkk.*, 2019b). MXene merupakan material dua dimensi mutakhir yang memiliki berbagai kemampuan seperti penyimpanan energi, penyerapan polutan, dan sensor elektrokimia yang didukung oleh struktur dua dimensi, konduktivitas listrik yang tinggi, hidrofilisitas yang baik, dan melimpahnya gugus fungsi di area permukaan (Li dan Fan, 2021, Park *dkk.*, 2023, Rajeev *dkk.*, 2023, Sarkar *dkk.*, 2024).

Metode pembuatan MXene umumnya melibatkan HF sebagai agen *etching*. Prosedur tersebut dinilai kurang ramah lingkungan karena penggunaan HF yang sangat korosif dan reaktif (Chen *dkk.*, 2023, Kruger *dkk.*, 2024). Sintesis MXene tanpa menggunakan HF masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada metode sintesis yang lebih aman dan ramah lingkungan. Penelitian yang dilakukan oleh Kruger *dkk.* (2024) menggunakan garam anorganik yang dilelehkan menggunakan bantuan garam $ZnCl_2$ yang menghasilkan Ti_3ZnC_2 diikuti dengan pencucian sehingga menghasilkan MXene dengan -Cl sebagai gugus fungsi.

Penemuan tersebut menjadi terobosan baru menggunakan garam halida logam transisi sebagai agen *etching* yang lebih efektif dan ramah lingkungan untuk mensintesis MXene. Metode ini didasarkan pada prinsip eutektik, yaitu penurunan titik leleh yang terjadi ketika dua atau lebih garam dicampurkan. Pencampuran ini menyebabkan terganggunya keteraturan struktur kristal padat yang berkontribusi pada peningkatan entropi sistem. Kenaikan entropi membuat sistem menjadi lebih stabil dalam fasa cair seiring dengan menurunnya energi bebas Gibbs. Hal tersebut membuat campuran garam eutektik memiliki titik leleh yang jauh lebih rendah dibandingkan garam murninya sehingga dapat memfasilitasi proses *etching* pada suhu yang lebih rendah dan efisien (Aleksandrov *dkk.*, 2020, Machon *dkk.*, 2005).

MXene merupakan kelompok material seperti grafena yang memiliki banyak kesamaan dari segi struktur dua dimensi dan luas permukaan yang besar. Namun, terdapat perbedaan mencolok yang terletak pada keberagaman gugus fungsional permukaannya (Kabir *dkk.*, 2025, Mohan *dkk.*, 2018). Grafena umumnya hanya mengandung gugus -OH, -COOH, dan epoksi (-O-), sedangkan gugus fungsional MXene lebih bervariasi seperti -O, -OH, -F, dan -Cl yang dapat dikontrol berdasarkan proses sintesis dan *etching* (Kumar *dkk.*, 2024). Keberagaman ini didukung dengan adanya unsur logam transisi dalam struktur MXene yang memberikan fleksibilitas dalam penyesuaian sifat kimia dan elektronik sehingga dapat dioptimalkan untuk berbagai aplikasi spesifik. Selain itu, struktur berlapis MXene memungkinkan integrasi dengan material lain untuk membentuk komposit. Karakteristik tersebut membuat MXene menjadi katalis yang prospektif dan unggul

dengan bantuan interkalasi senyawa tertentu, seperti logam oksida (Hamzehlouy dan Soroush, 2024).

Logam oksida merupakan salah satu material yang dapat digunakan untuk membentuk komposit bersama MXene. Logam oksida memiliki banyak keunggulan seperti memiliki kemampuan redoks yang baik, stabilitas termal yang tinggi, sifat permukaan aktif, dan ketersediaan yang melimpah di alam (Bandas *dkk.*, 2024). Aplikasi logam oksida sebagai katalis telah banyak dilakukan, misalnya oleh Manojkumar *dkk.* (2023) yang berhasil mendegradasi zat warna metilen biru menggunakan ZnO dengan persentase mencapai 93%. Selain itu, degradasi zat warna *eriochrome black t* juga berhasil dilakukan menggunakan SnO₂ dengan persentase degradasi mencapai 77% (Najjar *dkk.*, 2021).

Salah satu logam oksida yang menarik untuk diteliti adalah Fe₃O₄ karena memiliki sejumlah keunggulan yang mendukung penggunaannya dalam berbagai aplikasi, khususnya dalam bidang material dan katalisis. Keunggulan Fe₃O₄ terletak pada struktur kristal spinel yang memungkinkan eksistensi ion Fe²⁺ dan Fe³⁺ secara bersamaan dalam kisi kristal. Keberadaan dua tingkat valensi ini memberikan sifat redoks yang unggul dan mendukung terjadinya transfer elektron yang efisien sehingga dapat berperan signifikan dalam proses katalitik (Tatarchuk *dkk.*, 2022). Fe₃O₄ dapat disintesis melalui berbagai metode seperti kopresipitasi, sol-gel, ataupun hidrotermal (Torkaman *dkk.*, 2023). Hal ini didukung dengan ketersediaan unsur Fe yang melimpah dengan estimasi mencapai 85% di dalam inti bumi (McDonough, 2017).

Keunggulan Fe_3O_4 dalam sifat redoks serta kemudahan sintesisnya menjadikan material ini berpotensi sebagai komponen aktif dalam sistem degradasi polutan organik. Pencemaran lingkungan khususnya yang disebabkan oleh senyawa organik telah menjadi perhatian utama para ilmuwan karena dampaknya yang signifikan terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Salah satu sumber utama pencemaran ini adalah limbah cair industri yang mengandung senyawa organik stabil dan sulit diuraikan dengan metode konvensional seperti adsorpsi dan degradasi biologis (Kumar *dkk.*, 2021a). Metode adsorpsi bekerja dengan memindahkan polutan tanpa merusak struktur kimianya sehingga berisiko menghasilkan polutan sekunder. Sementara itu, degradasi biologis memerlukan kondisi lingkungan yang ideal bagi mikroorganisasi sehingga kurang stabil dan kurang efisien dalam skala besar (Deng *dkk.*, 2024, Xu *dkk.*, 2025).

Metode alternatif yang lebih efektif dan ramah lingkungan adalah pendekatan degradasi kimia melalui AOP (*Advanced Oxidation Process*). Metode AOP yang banyak dikembangkan adalah dengan mengaktivasi peroksimonosulfat (PMS) untuk menghasilkan radikal sulfat ($\text{SO}_4^{\bullet-}$) yang mampu mendegradasi polutan organik. Keunggulan PMS terletak pada kemampuannya yang dapat berkerja efektif meskipun dalam jumlah kecil dan tidak memerlukan energi eksternal tinggi seperti sinar UV.

Radikal bebas yang dihasilkan oleh PMS juga tidak berbahaya jika digunakan dibawah dosis maksimal (Ghanbari dan Moradi, 2016). Penelitian sebelumnya oleh Lu *dkk.* (2022) melaporkan bahwa material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{S-WO}_3$ pada konsentrasi 0,4 g/L dengan bantuan PMS mampu mendegradasi 20 ppm

kloroksilenol dengan efisiensi mencapai 93%. Berdasarkan penelitian tersebut, performa katalitik Fe_3O_4 dapat ditingkatkan melalui pembentukan komposit dengan MXene yang dikenal memiliki luas permukaan yang besar, keberagaman gugus fungsi permukaan, serta keberadaan logam transisi yang mampu meningkatkan reaktivitas redoks. Kombinasi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MXene}$ berpotensi menghasilkan sistem aktivator PMS yang lebih efisien dalam mengeliminasi polutan organik dari perairan.

Remazol yellow FG merupakan zat warna yang sering digunakan dalam industri tekstil. Penggunaannya bahkan mencapai 27% dari total pemakaian zat warna di industri tekstil (Handayani *dkk.*, 2016). Beberapa kelebihan *Remazol yellow* FG adalah mudah larut dalam air, warna yang cerah, dan stabil pada suhu aplikasi tinggi (90 °C) sehingga cocok digunakan dalam berbagai aplikasi industri (Fadil *dkk.*, 2020). Masifnya penggunaan *Remazol yellow* FG juga berdampak pada kenaikan persentase limbah yang dibuang ke perairan. Dalam perairan, *Remazol yellow* FG tergolong zat warna yang sulit terdegradasi karena memiliki tiga cincin benzena yang stabil dalam air (Koprivanac dan Vujevic, 2007). Hal tersebut berbahaya karena cincin benzen merupakan senyawa karsinogenik yang dapat merusak ekosistem perairan dan zat warna yang mencemari perairan dapat menghalangi penetrasi cahaya matahari (Lanjwani *dkk.*, 2024). Oleh karena itu, pada penelitian kali ini digunakan metode AOP dengan bantuan PMS yang diaktivasi oleh komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MXene}$ sebagai usaha mendegradasi *Remazol yellow* FG dalam perairan.

I.1 Tujuan Penelitian

1. Mensintesis MXene dengan metode yang aman dan ramah lingkungan.
2. Memperoleh komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MXene}$ serta mengetahui karakteristiknya.
3. Mengetahui kemampuan katalis komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MXene}$ sebagai aktivator PMS (peroksimonosulfat) dalam mendegradasi limbah zat warna *Remazol yellow* FG.