

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1. Latar Belakang dan Permasalahan

Pencemaran lingkungan akibat limbah cair industri merupakan salah satu permasalahan serius dalam bidang kimia lingkungan. Limbah cair dari industri makanan dan minuman umumnya mengandung senyawa organik kompleks seperti pewarna sintetis. Salah satu pewarna sintetis yang banyak digunakan adalah tartrazin (E102). Tartrazin adalah senyawa azo berwarna kuning yang larut dalam air dan digunakan secara luas sebagai aditif makanan dan minuman serta produk farmasi (Wang, dkk, 2022). Struktur tartrazin mengandung ikatan azo ($-N=N-$) yang terkonjugasi dengan cincin aromatic dan gugus sulfonat ($-SO_3Na$) yang meningkatkan kelarutan dalam air namun juga menambah kompleksitas struktur molekulnya (Widyasari & Khasanah, 2023). Kombinasi struktur ini membuat tartrazin resisten terhadap degradasi alami, dan dapat menimbulkan efek toksik dan alergi bagi manusia dan organisme akuatik, bahkan dalam konsentrasi rendah (Novais, dkk., 2022).

Pembuangan langsung limbah yang mengandung tartrazin ke lingkungan perairan menimbulkan masalah serius, bukan hanya karena menurunkan estetika (warna kuning mencolok yang mengurangi penetrasi cahaya dan mengganggu fotosintesis akuatik), tetapi juga karena potensi toksisitasnya. Produk degradasi parsial tartrazin, seperti asam sulfanilat dan aminopirazol, diketahui berpotensi menimbulkan efek merugikan pada hati dan ginjal pada dosis tinggi. Regulasi internasional telah menetapkan batas aman paparan tartrazin pada manusia ($ADI\ 0-7,5\ mg\cdot kg^{-1}\ bw\cdot day^{-1}$), tetapi beban tartrazin dalam limbah industri jauh melampaui paparan normal konsumen (Jackulin, dkk., 2024). Oleh sebab itu, pengolahan limbah industri yang mengandung tartrazin memerlukan pendekatan teknologi degradasi lanjut seperti fotokatalisis, yang tidak hanya menghilangkan warna, tetapi juga memineralisasi senyawa berbahaya menjadi bentuk yang lebih aman bagi lingkungan.

Pencemaran zat warna seperti tartrazin dapat diatasi dengan fotokatalisis, yakni proses oksidasi-reduksi yang menggunakan semikonduktor yang diaktivasi cahaya untuk menghasilkan radikal bebas yang dapat memecah molekul organik menjadi senyawa sederhana (Rafiq dkk., 2021). Proses ini melibatkan eksitasi elektron dari pita valensi (*valence band*) ke pita konduksi (*conduction band*) semikonduktor saat menyerap cahaya, sehingga menghasilkan pasangan elektron-hole (e^-/h^+) yang kemudian bereaksi dengan molekul air dan oksigen terlarut untuk membentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$). Radikal ini adalah spesies reaktif yang mampu merusak ikatan azo dan cincin aromatik tartrazin hingga terdegradasi menjadi H_2O , CO_2 , dan ion anorganik (Ramesh dkk., 2024).

Salah satu material semikonduktor yang umum digunakan dalam fotokatalisis adalah ZnO (Seng Oksida), yang memiliki energi celah pita (*band gap*) sebesar $\sim 3,37$ eV. ZnO memiliki sifat non-toksik, murah, dan stabil secara termal. Namun, material ini memiliki keterbatasan, yaitu hanya aktif di bawah radiasi UV dan memiliki tingkat rekombinasi pasangan e^-/h^+ yang tinggi (Virrisya & Astuti, 2019). Untuk meningkatkan aktivitasnya, ZnO dapat dimodifikasi melalui doping logam transisi, seperti Mn^{2+} , ke dalam kisi kristalnya (Kumaravel dkk., 2021). Doping Mn dapat menciptakan tingkat energi antara pita valensi dan pita konduksi, sehingga menurunkan band gap dan memungkinkan aktivasi oleh cahaya tampak (Ishfaq dkk., 2024). Selain itu, keberadaan Mn dapat berperan sebagai perangkap muatan yang memperlambat rekombinasi e^-/h^+ , sehingga meningkatkan efisiensi fotokatalitik.

Penggunaan ZnO terdoping Mn dalam bentuk serbuk memiliki keterbatasan dalam aplikasi nyata, seperti sulit dipisahkan kembali dari larutan reaksi dan cenderung mengalami aglomerasi partikel (Ishfaq dkk., 2024). Oleh karena itu, dibutuhkan media pendukung yang dapat memfasilitasi dispersi dan pemanfaatan ulang partikel, salah satunya melalui pembentukan membran fotokatalitik berbasis biopolimer. Kitosan, polimer alami hasil deasetilasi kitin, dipilih sebagai matriks karena memiliki sifat biodegradable, biokompatibel, serta mengandung gugus amino ($-\text{NH}_2$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) yang memungkinkan interaksi kuat dengan

nanopartikel. Kitosan juga mampu meningkatkan adsorpsi awal polutan karena muatannya yang positif pada pH rendah (Mendis dkk., 2023).

Selain itu, untuk meningkatkan fleksibilitas dan kekuatan mekanik membran, maka gliserol digunakan sebagai *plasticizer*. Gliserol dapat menurunkan tegangan antar rantai polimer kitosan, sehingga membran tidak rapuh dan lebih stabil dalam lingkungan berair (Cengristitama, 2022). Penelitian oleh Nhung T. Tuyet Hoang dan D. Duc Nguyen (2023) menunjukkan bahwa pada sistem kitosan-TiO₂, penambahan gliserol hingga konsentrasi optimum (sekitar 40% terhadap kitosan) dapat meningkatkan hidrofilitas, dispersi fotokatalis, dan efisiensi fotokatalitik melalui penekanan rekombinasi elektron-hole (Hoang & Nguyen, 2023). Namun, penelitian lain melaporkan bahwa gliserol berlebih dapat bertindak sebagai *radical/hole scavenger* yang mengonsumsi spesies reaktif dan membentuk lapisan penghalang pada permukaan katalis, sehingga menurunkan laju degradasi pewarna. Studi oleh Tran dkk. (2022) juga menegaskan bahwa meskipun gliserol meningkatkan sifat mekanik dan adsorpsi awal pada membran kitosan-TiO₂, kelebihan gliserol dapat mengurangi efektivitas fotokatalitik akibat berkurangnya keterpaparan situs aktif dan terganggunya transfer muatan (Tran dkk., 2022).

Melalui pendekatan ini, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan membran fotokatalitik kitosan-ZnO terdoping Mn-gliserol dan mengevaluasi struktur serta sifat fisikokimia material tersebut, serta menguji efektivitasnya dalam degradasi fotokatalitik tartrazin sebagai model pencemar dalam limbah cair industri. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material ramah lingkungan berbasis teknologi kimia hijau dalam pengolahan air tercemar.

1. 2. Rumusan Masalah

- 1.2.1 Bagaimana sintesis dan karakterisasi ZnO dan ZnO terdoping Mn?
- 1.2.2 Bagaimana sintesis dan karakteristik fisikokimia dari membran kitosan yang dimodifikasi dengan ZnO, ZnO terdoping Mn dan ZnO terdoping Mn-Gliserol?
- 1.2.3 Bagaimana efektivitas membran dalam mendegradasi pewarna tartrazin melalui proses fotokatalisis?

1. 3. Tujuan Penelitian

1. Mensintesis dan mengkarakterisasi ZnO dan ZnO terdoping Mn.
2. Mensintesis dan menganalisis karakteristik fisikokimia dari membran berbasis kitosan yang dimodifikasi dengan ZnO, ZnO terdoping Mn dan ZnO terdoping Mn-Gliserol.
3. Mengevaluasi efektivitas fotokatalitik masing-masing membran (ZnO, ZnO terdoping Mn dan ZnO terdoping Mn-Gliserol) dalam mendegradasi pewarna tartrazin dibawah paparan sinar tampak serta menentukan laju degradasi dan efisiensi degradasi yang dihasilkan.

1. 4. Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Teoritis

1. Menambah khasanah keilmuan dibidang kimia material, khususnya mengenai sintesis dan karakterisasi material fotokatalitik berbasis kitosan yang dimodifikasi dengan nanopartikel ZnO melalui doping logam (Mn).
2. Memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan teknologi membrane komposit sebagai sistem fotokatalitik untuk pengolahan limbah pewarna cair dengan fokus pada pewarna tartrazin yang tergolong sulit terdegradasi.
3. Memberikan data empiris terkait pengaruh dopping Mn dan penambahan gliserol terhadap struktur kimia, sifat fisikokimia dan efisiensi fotokatalitik dari membran yang dihasilkan.

1.4.2 Manfaat Praktis

1. Menjadi dasar pengembangan teknologi limbah cair industri seperti industri makanan dan tekstil yang menggunakan pewarna tartrazin.
2. Memberikan alternatif material ramah lingkungan dan ekonomis untuk sistem fotokatalitik, mengingat penggunaan kitosan dari biomassa dan sintesis ZnO yang relatif murah.
3. Memberikan solusi untuk meningkatkan stabilitas mekanik dan fleksibilitas melalui penambahan gliserol sebagai *plasticizer* yang relevan sebagai aplikasi pemurnian limbah secara berkelanjutan