

BAB I

PENDAHULUAN

I. 1 Latar Belakang

Pencemaran lingkungan dari limbah zat warna telah meningkat karena industri tekstil belum sepenuhnya mampu mengolah limbahnya dengan baik. Industri tekstil biasanya menghasilkan limbah zat warna yang terdiri dari senyawa organik yang tidak dapat diuraikan secara biologi. Faktanya hanya setengah pewarna diserap oleh bahan tekstil selama proses pencelupan dan setengah lainnya hilang dalam proses pembilas (efluen) tekstil. Akibatnya, pewarna dapat mencemari lingkungan dalam konsentrasi yang besar (Musafira dkk., 2019).

Salah satu pewarna zat organik yaitu Rhodamin B yang berupa pewarna merah keunguan yang mudah larut dalam air dan biasanya digunakan untuk pewarna cat, tekstil, dan kertas. Rhodamin B yang konsentrasinya berlebihan dalam air akan mengubah pH air, mengganggu hewan dan mikroorganisme di perairan (Purnamawati dkk., 2015). Industri tekstil harus mengolah limbah cairnya sebelum dibuang ke sungai karena dapat terjadi kontaminasi (Naimah dkk., 2014). Tujuan pengolahan limbah cair ini adalah untuk mengurangi konsentrasi dan toksisitas kontaminan dalam limbah cair sehingga dapat dibuang ke lingkungan dengan konsentrasi yang diperbolehkan yaitu sebesar 0,01 ppm (Srivastava dkk., 2004). Oleh karena itu dilakukan upaya untuk mengurangi dampak pencemaran yang dihasilkan oleh pewarna sintetis dari limbah industri karena pewarna tersebut sangat berbahaya bagi makhluk hidup di perairan.

Beberapa metode yang sering diterapkan untuk menghilangkan zat warna antara lain koagulasi, flokulasi, ozonasi, degradasi fotokatalitik, dan adsorpsi. Pada proses koagulasi, partikel koloid dibuat menjadi tidak stabil, sedangkan flokulasi berfungsi untuk menggabungkan partikel tersebut menjadi gumpalan yang lebih besar sehingga dapat mengendap (Indah & Utami, 2024). Ozonasi adalah proses pengolahan air yang menggunakan gas ozon (O_3) sebagai oksidator kuat untuk mengoksidasi polutan organik. Ozon dapat bereaksi langsung menguraikan bahan organik, atau terdekomposisi membentuk radikal hidroksil ($\bullet OH$) yang sangat reaktif untuk mempercepat degradasi polutan. Namun, ozonasi murni memiliki keterbatasan seperti biaya produksi tinggi, kelarutan dan stabilitas rendah dalam air, serta reaktivitas lambat terhadap senyawa organik tertentu sehingga tidak selalu menghasilkan mineralisasi penuh. Di sisi lain, metode adsorpsi (misalnya menggunakan karbon aktif) hanya menyerap polutan ke permukaan adsorben tanpa menguraikannya, sehingga polutan tersebut dipindahkan ke media lain (Mehrijouei dkk., 2015).

Fotoelektrokimia merupakan gabungan antara proses fotokimia dan elektrokimia, dimana reaksi kimia berlangsung didalam suatu sel yang memanfaatkan cahaya sebagai sumber energi untuk mengaktifkan katalis (Suharyadi dkk., 2023). Fotokatalisis merupakan salah satu metode efektif untuk degradasi zat warna organik dalam air limbah salah satunya yaitu fotokatalisis heterogen. Fotokatalisis heterogen adalah salah satu proses yang efektif untuk menguraikan polutan organik di air. Prinsip fotokatalisis adalah aktivasi semikonduktor oleh cahaya saat foton dengan energi lebih besar dari *band gap* yang

diserap, elektron (e^-) tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan lubang elektron (h^+) di pita valensi (Kamble dkk., 2023). Pasangan *electron-hole* ini selanjutnya berinteraksi dengan molekul air atau oksigen teradsorpsi pada permukaan katalis untuk menghasilkan spesies radikal sangat reaktif, seperti radikal hidroksil ($\bullet OH$) dan superoksida ($O_2\bullet^-$). Spesies radikal tersebut kemudian menyerang dan mengoksidasi polutan organik menjadi produk yang lebih sederhana atau terkarbonasi penuh (Mehrjouei dkk., 2015). Kelebihan ini membuat fotokatalisis menjadi teknologi ramah lingkungan yang menjanjikan untuk pengolahan limbah cair.

Dalam fotokatalisis heterogen, peran semikonduktor sangat krusial karena menentukan kemampuan katalis dalam menyerap cahaya dan membentuk pasangan *electron-hole*. Semikonduktor seperti TiO_2 dan ZnO banyak digunakan karena stabil dan tahan korosi. Namun TiO_2 memiliki *band gap* 3,2 eV, sehingga hanya aktif di bawah cahaya ultraviolet (UV) dan hanya memanfaatkan kurang dari 4% spektrum cahaya matahari. Oleh karena itu, penelitian fotokatalisis saat ini banyak difokuskan pada pengembangan semikonduktor sensitif cahaya tampak (*visible*) dengan *band gap* lebih rendah (Kamble dkk., 2023).

Photoelectrocatalysis (PEC) merupakan metode pemurnian air berbasis fotokatalisis yang diperkuat secara elektrokimia dengan bantuan fotoelektroda, yaitu elektroda semikonduktor yang aktif terhadap cahaya. Penerapan tegangan eksternal (bias) pada sistem PEC membantu pemisahan muatan *electron* dan *hole*, meningkatkan efisiensi reaksi oksidasi-reduksi, serta menghasilkan spesies oksigen

reaktif (ROS) yang berperan penting dalam degradasi kontaminan organik maupun mikroorganisme di dalam air (McMichael dkk., 2021).

Bismuth vanadat (BiVO_4) dikenal sebagai salah satu material fotokatalis yang unggul karena memiliki celah pita energi (*band gap*) yang sempit di kisaran 2,3 – 2,4 eV yang memungkinkan untuk menyerap cahaya tampak secara efektif. Pada penelitian ini, *band gap* berperan penting karena menentukan efisiensi fotokatalis untuk degradasi Rhodamin B. Fotokatalis terjadi ketika BiVO_4 menyerap foton dengan energi yang lebih besar atau sama dengan *band gap*-nya. Namun, salah satu keterbatasan BiVO_4 adalah rekombinasi cepat antara *electron* dan *hole* yang dapat mengurangi efisiensi fotokatalitiknya (Kamble dkk., 2023). Berbagai metode sintesis BiVO_4 telah dikembangkan. Misalnya, metode hidrotermal dan solvothermal menggunakan reaksi dalam autoklaf.

Pada metode hidrotermal, larutan berair prekursor Bi^{3+} dan V_2O_5 dipanaskan dalam autoklaf bertekanan tinggi, sehingga oksida terlarut membentuk kristal BiVO_4 tunggal saat larutannya mendingin. Metode ini mampu menghasilkan partikel kristalin berukuran seragam dengan kontrol komposisi kimia, tapi memerlukan peralatan autoklaf yang mahal dan waktu reaksi relatif lama (Hussain dkk., 2025). Sebaliknya, solvothermal bekerja serupa, tetapi menggunakan pelarut organik (misalnya alkohol) alih-alih air. Reaksi pada suhu di atas titik didih pelarut menghasilkan kristal BiVO_4 dengan morfologi terkontrol dan kristalinitas tinggi. Keunggulan solvothermal adalah mampu memadukan kelebihan metode hidrotermal dan sol-gel, yaitu pembentukan morfologi partikel yang baik dan kristal berkualitas tinggi (Hussain dkk., 2025).

Metode sol–gel menggunakan prekursor berbasis alkoksida atau garam logam yang dilarutkan kemudian diubah menjadi gel. Setelah itu gel dikalsinasi untuk membentuk BiVO_4 padat (Hussain dkk., 2025). Metode presipitasi (*co-precipitation*) merupakan teknik sederhana dan murah, di mana larutan prekursor Bi dan V dicampur dengan agen pengendap (misalnya basa NaOH atau NH_3) hingga terbentuk padatan presipitat tidak larut. Presipitat ini kemudian dikalsinasi untuk membentuk oksida BiVO_4 . Keunggulan metode ini adalah reaksi berlangsung pada suhu rendah, biaya kimia relatif kecil, dan dapat menghasilkan partikel halus yang seragam dengan fasa kristal tunggal (Hussain dkk., 2025).

Maka dari itu, strategi seperti modifikasi morfologi, doping, atau metode sintesis yang optimal seperti *dip coating* digunakan dalam penelitian ini. Metode *dip coating* memungkinkan pembentukan lapisan tipis yang seragam pada substrat. Jika dibandingkan dengan metode sintesis lain, metode *dip coating* lebih unggul karena tidak memerlukan bahan kimia tambahan yang berpotensi mencemari lingkungan, prosesnya yang sederhana, biaya yang relatif rendah, serta penggunaan peralatan yang tidak terlalu kompleks. Metode ini telah berhasil diterapkan untuk menghasilkan lapisan tipis material ferroelektrik, semikonduktor elektronik, dan lapisan transparan konduktif (Sanjaya dkk., 2007). (da Silva dkk., 2016) juga melaporkan bahwa elektroda FTO/ BiVO_4 hasil metode *dip coating* efektif mendegradasi pewarna organik metilen biru dengan laju kinetika yang tinggi, menggambarkan potensi serupa untuk degradasi Rhodamin B.

Walaupun penggunaan BiVO_4 untuk degradasi polutan organik telah banyak dikaji (misalnya pewarna metilen biru), penelitian khusus tentang lapisan

tipis BiVO_4 hasil *dip coating* sebagai elektroda untuk degradasi Rhodamin B masih relatif terbatas. Beberapa studi terdahulu misalnya melibatkan BiVO_4 dalam heterojunction p–n (dengan NiO) untuk mendegradasi metilen biru (da Silva dkk., 2016), namun literatur yang mengkhususkan pada degradasi Rhodamin B dengan BiVO_4 *dip coating* hampir belum ditemukan. (Ali dkk., 2025) bahkan mencatat bahwa kajian mengenai fotoanoda BiVO_4 untuk degradasi polutan organik (termasuk pewarna) pada skala nyata masih sangat sedikit. Kondisi ini menunjukkan celah riset penting yaitu perlunya eksplorasi lebih lanjut penggunaan lapisan BiVO_4 yang disintesis melalui *dip coating* pada substrat FTO untuk proses fotoelektrokatalisis degradasi Rhodamin B.

Sejauh ini, penelitian mengenai variasi kondisi sintesis BiVO_4 menggunakan metode *dip coating* untuk aplikasi fotodegradasi Rhodamin B masih terbatas. Maka dari itu, dilakukan penelitian ini untuk mengkaji sintesis BiVO_4 menggunakan metode *dip coating* dan mengevaluasi efektivitasnya dalam mendegradasi Rhodamin B secara fotoelektrokatalisis.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Mensistesis material BiVO_4 menggunakan metode *dip coating* untuk degradasi fotoelektrokatalisis Rhodamin B.
2. Melakukan karakteristik lapisan tipis BiVO_4 hasil sintesis pada kaca FTO.
3. Mengevaluasi kinerja fotoelektrokatalis BiVO_4 dalam degradasi Rhodamin B di bawah paparan cahaya tampak.