

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri tekstil di Indonesia mengalami pertumbuhan yang cukup pesat. Sektor ini memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian negara, dengan rata-rata pendapatan devisa yang diperoleh mencapai US\$7,92 miliar dan tingkat pertumbuhan sebesar 8,5%, menjadikannya salah satu penyumbang devisa terbesar dari seluruh komoditas ekspor Indonesia (Oko *et al.*, 2022). Selain itu, industri tekstil juga berperan penting dalam penyediaan lapangan pekerjaan.

Peningkatan volume produk sampingan menjadi konsekuensi logis dari pesatnya perkembangan industri tersebut. Salah satu bentuk buangan dari industri tekstil yang merugikan lingkungan adalah limbah cair sisa pewarnaan. Polutan ini umumnya mengandung pewarna sintetik berstruktur senyawa aromatik kompleks, sebuah karakteristik kimiawi yang membuatnya sangat resisten terhadap penguraian alami oleh mikroorganisme. Ketika dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan, zat warna ini dapat mencemari perairan dan merusak ekosistem (Nurlaela *et al.*, 2014).

Pewarna sintetik sifatnya yang awet dan tidak gampang pudar membuat pewarna sintetik menjadi pilihan utama dalam industri tekstil. Meski demikian, karakteristik kimianya yang berupa senyawa aromatik kompleks memicu resistensi tinggi terhadap penguraian biologis. Akibatnya digunakan dalam industri tekstil karena warnanya yang tahan lama dan tidak mudah luntur. Namun, senyawa ini merupakan senyawa aromatik kompleks yang sukar terurai secara alami,

sehingga berpotensi mencemari lingkungan air. Limbah cair dari industri tekstil mengandung pewarna 8-20% karena efek dari proses pewarnaan (Rahmawati 2021). Limbah yang dihasilkan mengandung senyawa organik yang sulit terurai secara alami, sehingga berisiko mencemari ekosistem, terutama perairan (Oko *et al.*, 2022).

Salah satu zat warna yang dihasilkan dari limbah cair industri tekstil adalah *remazol yellow*, yang berasal dari proses pencelupan, pencucian, dan penyempurnaan kain. *Remazol yellow* merupakan pewarna sintetis yang termasuk ke dalam kelompok *azo dye*, yaitu senyawa yang memiliki struktur kimia dengan ikatan azo ($-N=N-$) sebagai kromofor utama penyebab warna. Zat warna ini banyak digunakan dalam industri tekstil karena mampu menghasilkan warna kuning yang cerah, stabil, serta memiliki daya ikat yang baik terhadap serat kain. Selain pada industri tekstil, *remazol yellow* juga digunakan pada industri tinta dan kertas karena sifat pewarnaannya yang kuat dan tahan lama.

Remazol yellow termasuk zat warna reaktif yang umumnya memiliki gugus vinil sulfonat dan gugus sulfonat ($-SO_3^-$) pada struktur molekulnya. Gugus sulfonat menyebabkan zat warna ini mudah larut dalam air, sedangkan gugus vinil sulfonat memungkinkan terbentuknya ikatan kovalen dengan serat tekstil sehingga warna lebih tahan terhadap pencucian dan gesekan. Keberadaan cincin aromatik dan sistem ikatan terkonjugasi pada struktur *remazol yellow* menyebabkan zat warna ini memiliki kestabilan kimia yang tinggi dan sulit mengalami degradasi secara alami.

Meskipun memiliki banyak kegunaan dalam industri, *remazol yellow* juga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan apabila limbahnya dibuang tanpa pengolahan yang tepat. *remazol yellow* termasuk senyawa non-biodegradable sehingga sulit diuraikan oleh mikroorganisme alami di lingkungan perairan. Keberadaan zat warna ini di badan air dapat menyebabkan perubahan warna air dan menghambat penetrasi cahaya matahari ke dalam perairan.

Kondisi tersebut dapat mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik seperti alga dan fitoplankton sehingga memengaruhi keseimbangan ekosistem perairan.

Di samping itu, degradasi parsial pada senyawa *azo* dalam *remazol yellow* dapat memicu terbentuknya amina aromatik, sebuah senyawa beracun yang mengancam keselamatan makhluk hidup. Keberadaan limbah zat warna ini juga memicu lonjakan parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) di dalam air. Akibatnya, konsentrasi oksigen terlarut akan merosot tajam, sebuah kondisi yang tidak hanya mengganggu kelangsungan hidup biota akuatik tetapi juga memperburuk mutu ekosistem perairan secara keseluruhan.

Dampak buruk *remazol yellow* nyatanya tidak terbatas pada ekosistem perairan; akumulasi zat ini di alam juga berpotensi mengontaminasi tanah. Keberadaan polutan tersebut dapat menghambat aktivitas mikroba tanah yang memegang peranan krusial dalam memelihara stabilitas ekosistem terestrial. Atas dasar itulah, penerapan teknik pengolahan limbah yang efisien mutlak diperlukan guna mereduksi kadar *remazol yellow* sebelum dilepas ke lingkungan. Di antara berbagai alternatif yang ada, metode adsorpsi berbasis material adsorben seperti, hidroksiapatit karena dinilai efektif, sederhana, dan ramah lingkungan (Masthura, 2019).

Sehingga limbah cair tekstil harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang (Oko *et al.*, 2022). Penanganan limbah cair tekstil umumnya mengombinasikan atau memilih salah satu dari jalur pengolahan kimia, fisika, dan biologi. Beberapa metode populasinya antara lain sedimentasi, koagulasi, lumpur aktif, dan adsorpsi. Sebagai salah satu teknik terpraktis, adsorpsi bekerja dengan mekanisme pengikatan senyawa dari fase fluida ke permukaan material padat hingga membentuk lapisan molekul yang tipis. (Oko *et al.*, 2022). Metode adsorpsi kerap menjadi pilihan utama dalam sistem pemurnian air. Hal ini didasari oleh skema aplikasinya yang praktis, efisiensi biaya

operasional yang tinggi, serta sistem perawatan instrumen yang relatif sederhana dan mudah dilakukan. (Setyopratomo *et al.*, 2022).

Adsorben yang baik biasanya memiliki pori-pori kecil yang membuat luas permukaannya besar, sehingga efektif dalam menyerap zat. Adsorben yang telah jenuh masih dapat diregenerasi untuk digunakan kembali. Salah satu adsorben alternatif yang murah dan mudah didapatkan adalah cangkang telur bebek (Dwipawangsa 2024).

Indonesia memiliki potensi limbah cangkang telur bebek yang cukup besar. Menurut Direktorat Jenderal Peternakan dan Kesehatan Hewan, produksi telur ayam dan bebek di Indonesia mencapai 2.084.641 ton pada tahun 2020 (Dwipawangsa 2024). Cangkang telur bebek tersusun dari 94-97% CaCO_3 , (CaO) dan asam amino, sisanya berupa bahan organik dan pigmen. Pada kulit telur terdapat pori-pori, pori-pori ini berukuran 0,01-0,07 mikron dan tersebar di seluruh permukaan telur. Bagian ujung cangkang telur yang tumpul mempunyai pori-pori per satuan luas yang lebih banyak dibandingkan bagian cangkang telur lainnya (Nova *et al.*, 2014). Kapasitas cangkang telur bebek sebagai adsorben tidak hanya ditandai oleh keberadaan struktur pori, melainkan juga oleh ketersediaan gugus fungsi pada permukaannya. Gugus reaktif seperti hidroksil, amina, dan asam sulfonat memegang peranan penting dalam mengikat molekul zat warna. Sejauh ini, pemanfaatan cangkang telur ayam memang lebih mendominasi ranah penelitian akibat tingkat konsumsi masyarakat yang tinggi. Walau demikian, cangkang telur bebek sebenarnya menyimpan potensi adsorpsi yang lebih unggul *завдяки* kadar kalsium karbonat (CaCO_3) yang lebih pekat, ketahanan mekanis yang lebih kuat, serta tingkat porositas yang optimal pasca-aktivasi. Sayangnya, potensi limbah organik ini kerap terabaikan hingga menjadi beban pencemaran lingkungan. Berangkat dari kondisi tersebut, eksplorasi limbah cangkang telur bebek sebagai bahan adsorben ekonomis dan ramah lingkungan menjadi sangat krusial untuk

dikembangkan. (Aritonang, 2019). Oleh karena itu, perlu dikembangkan penelitian untuk memanfaatkan limbah ini secara optimal.

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa cangkang telur bebek mempunyai potensi untuk dikembangkan sebagai adsorben pewarna tekstil karena kaya akan gugus aktif dan manfaat ekonomi. Cangkang telur bebek dan ayam sebagai adsorben dipelajari oleh (Nurlaili *et al.*, 2017), yaitu dengan menggunakan limbah cangkang telur bebek dan ayam sebagai adsorben zat warna metil jingga dalam larutan, efek adsorpsi terbaik diperoleh pada massa adsorben 11 gram, waktu kontak 60 menit, dan pH 1. Efisiensi adsorpsi sebesar 41,46% dan kapasitas adsorpsi sebesar 59,55 mg/g. (Ratnasari *et al.*, 2017) juga telah melakukan penelitian terkait penggunaan cangkang telur sebagai adsorben untuk menurunkan kadar tembaga (Cu) pada limbah cair industri elektroplating yang terlebih dahulu telah diaktivasi secara fisika dengan hasil yang didapat adalah konsentrasi serbuk cangkang telur ayam 30 g/L yang menunjukkan penurunan tertinggi pada kadar Cu sebesar 69,23%. Karena keberadaan limbah cangkang telur yang cukup melimpah serta kandungan CaCO_3 yang tinggi menyebabkan cangkang kulit telur, khususnya cangkang telur bebek dapat digunakan sebagai sumber kalsium untuk sintesis hidroksiapatit, dan juga dapat meningkatkan nilai penggunaan cangkang kulit telur bebek.

Hidroksiapatit merupakan senyawa apatit dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Hidroksiapatit digunakan dalam bidang kedokteran, bioteknologi dan lingkungan. Dalam bidang kedokteran dan bioteknologi, hidroksiapatit digunakan dalam implan biomedis, regenerasi tulang, dan rekonstruksi jaringan tulang yang rusak. Sedangkan di bidang lingkungan, hidroksiapatit dapat dimanfaatkan dalam pengolahan air limbah karena kemampuannya dalam menyerap logam berat. Hidroksiapatit dapat diperoleh dari bahan alami, karena penggunaan bahan alami lainnya memiliki risiko yang lebih rendah dibandingkan hidroksiapatit sintetik. Pembuatan hidroksiapatit

memerlukan bahan yang mengandung kalsium dan fosfat, kemudian hidroksiapatit tersebut disintesis melalui berbagai metode, seperti presipitasi dan hidrotermal, dan sol-gel (Dwipawangsa 2024). Ukuran partikel hidroksiapatit yang kecil akan memperluas bidang kontak antara implan dengan jaringan sekitar, yang akan membuat ikatan yang diperoleh dapat lebih baik (Hutabarat *et al.*, 2019). Sintesis hidroksiapatit sangat dipengaruhi oleh temperatur kalsinasi dan waktu kalsinasi berdasarkan karakteristik kristalinitas hidroksiapatit.

(Oko *et al.*, 2022) Berdasarkan laporan penelitian tersebut, dilakukan optimasi terhadap variasi massa adsorben komposit CaO dari cangkang telur dan karbon teraktivasi dalam proses penyisihan zat warna *methylene blue*. Hasil pengujian menunjukkan adanya korelasi positif: peningkatan massa adsorben selama proses berlangsung berbanding lurus dengan kenaikan efisiensi adsorpsi serta penurunan konsentrasi *methylene blue*. Kondisi optimum untuk penyerapan zat warna ini dicapai pada penggunaan campuran adsorben berbasis CaO dengan komposisi 10 gram cangkang telur dan karbon aktif. Konsentrasi akhir zat warna metilen biru sebesar 0,0139 ppm, dan efisiensi adsorpsi zat warna metilen biru sebesar 99,9861%. Adapun beberapa penelitian yang relevan untuk mendukung penelitian penulis, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh (Nurlaili *et al.*, 2017), Studi tersebut berfokus pada pemanfaatan limbah cangkang telur ayam sebagai material adsorben untuk menyisihkan zat warna *methyl orange* dalam media larutan. Hasil pengujian membuktikan bahwa efektivitas proses adsorpsi *methyl orange* berbasis serbuk cangkang telur ayam ini dipengaruhi secara signifikan oleh tiga parameter utama, yaitu massa adsorben, durasi waktu kontak, serta tingkat keasaman (pH) larutan. Kondisi terbaik adsorpsi terjadi pada, massa adsorben 11 gram, waktu kontak 60 menit dan pH 1 dengan persentase adsorpsi sebesar 41,46 %.

Sintesis hidroksiapatit dalam penelitian ini akan menerapkan metode pengendapan (*precipitation method*), yang merupakan salah satu turunan dari teknik kimia basah (*wet chemical method*) yang sangat populer. Metode ini dipilih karena menawarkan sejumlah keunggulan, meliputi efisiensi biaya bahan baku, kontrol reaksi yang optimal, serta kemampuan menghasilkan partikel berukuran mikro dengan tingkat keseragaman yang tinggi. Di samping itu, prosesnya bersifat ramah lingkungan dan minim risiko kontaminasi, sehingga mampu menjamin kemurnian produk yang tinggi. Eksperimen ini melibatkan waktu kontak, pH, dan konsentrasi zat warna sebagai variabel bebas, sementara massa hidroksiapatit dari cangkang telur bebek ditetapkan sebagai variabel kontrol.

Untuk menjawab rumusan masalah, diperlukan pemahaman yang kuat mengenai faktor-faktor yang memengaruhi proses adsorpsi. Karakterisasi hidroksiapatit dari cangkang telur bebek pada berbagai suhu kalsinasi penting untuk menentukan suhu optimum yang menghasilkan struktur dan porositas terbaik (Dwipawangsa 2024). Waktu kontak optimum diperlukan agar adsorpsi berlangsung efisien tanpa pemborosan waktu dan energi (Oko *et al.*, 2022). Selain itu, pH dan konsentrasi zat warna berpengaruh terhadap muatan permukaan adsorben dan kestabilan senyawa dalam larutan (Dwipawangsa 2024). Studi isoterm membantu memahami mekanisme dan kapasitas maksimum adsorpsi (Noroozi, 2008), sedangkan analisis termodinamika dan kinetika diperlukan untuk mengetahui sifat spontan dan laju proses adsorpsi (Masthura, 2019). Atas dasar tersebut, kelima pilar fokus penelitian ini memiliki landasan ilmiah yang solid dan krusial untuk dieksplorasi lebih mendalam. Meskipun sintesis hidroksiapatit sebagai material adsorben zat warna telah marak diteliti dengan memanfaatkan cangkang telur ayam sebagai sumber kalsium, eksploitasi cangkang telur bebek sebagai prekursor untuk menyisihkan *remazol yellow* masih sangat minim. Terlebih lagi, kajian komprehensif yang membedah karakteristik penyerapan

remazol yellow oleh hidroksiapatit cangkang telur bebek ditinjau dari aspek isoterm, kinetika, serta termodinamika adsorpsi masih jarang dipublikasikan. Oleh sebab itu, studi ini diinisiasi untuk mengevaluasi efektivitas hidroksiapatit berbasis cangkang telur bebek sebagai agen adsorpsi sekaligus memetakan mekanisme proses adsorpsinya. (Dwipawangsa 2024).

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dirancang untuk memecahkan sejumlah persoalan ilmiah terkait kapabilitas hidroksiapatit berbasis cangkang telur bebek sebagai material adsorben untuk zat warna *remazol yellow*. Adapun poin-poin rumusan masalah yang menjadi fokus utama dalam kajian ini meliputi hal-hal berikut. Bagaimana karakteristik hidroksiapatit hasil sintesis dari cangkang telur bebek berdasarkan analisis FTIR, XRD, dan SEM-EDX?

1. Bagaimana pengaruh waktu kontak, pH, dan konsentrasi terhadap adsorpsi *remazol yellow* menggunakan hidroksiapatit?
2. Berapakah kondisi optimum dari waktu kontak, pH, dan konsentrasi adsorpsi *remazol yellow* menggunakan hidroksiapatit?
3. Bagaimana model isoterm, kinetika, dan termodinamika adsorpsi *remazol yellow* menggunakan hidroksiapatit?

1.3 Tujuan Penelitian

Berlandaskan pada rumusan masalah yang telah dipaparkan, sasaran utama yang ingin dicapai melalui penelitian ini dirinci sebagai berikut.

1. Mengetahui karakteristik hidroksiapatit hasil sintesis dari cangkang telur bebek berdasarkan analisis FTIR, XRD, dan SEM-EDX.

2. Mengetahui pengaruh waktu kontak, pH, dan konsentrasi terhadap adsorpsi *remazol yellow* menggunakan hidroksiapatit.
3. Menentukan kondisi optimum dari waktu kontak, pH, dan konsentrasi adsorpsi *remazol yellow* menggunakan hidroksiapatit.
4. Menentukan model isoterm, kinetika, dan termodinamika adsorpsi *remazol yellow* menggunakan hidroksiapatit.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Teoritis

Manfaat teoritis dari penelitian ini adalah memberikan kontribusi terhadap kemajuan ilmu material dan kimia lingkungan, khususnya dalam pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai sumber kalsium untuk sintesis hidroksiapatit. Kajian ini juga memperkaya pemahaman tentang hubungan suhu kalsinasi dengan struktur dan sifat hidroksiapatit yang dihasilkan, sehingga dapat menjadi dasar pengembangan material berbasis kalsium untuk berbagai aplikasi. Dan mendukung keberlanjutan dan pengelolaan limbah dengan memanfaatkan cangkang telur, yang selama ini dianggap sebagai limbah tidak berharga, menjadi bahan yang fungsional. Hal ini sejalan dengan gagasan ekonomi sirkular, dimana sampah dapat diolah kembali untuk tujuan yang lebih bermanfaat sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

1.4.2 Manfaat Praktis

- a. Bagi instansi terkait

Penelitian ini dapat menjadi masukan bagi pengembangan kebijakan pengelolaan limbah industri, khususnya penerapan peraturan yang lebih ketat mengenai pembuangan limbah cair berbahaya ke lingkungan. Dan dapat membantu lembaga lingkungan hidup

mengembangkan metode pembuangan limbah yang lebih ramah lingkungan dan mendorong penggunaan bahan alami seperti cangkang telur sebagai alternatif pengolahan limbah industri tekstil.

b. Bagi industri tekstil

Penelitian ini memberikan solusi praktis terhadap pembuangan limbah cair berwarna, yang seringkali menjadi masalah utama pencemaran lingkungan.

c. Bagi mahasiswa

Penelitian ini dapat menjadi referensi untuk memahami konsep adsorpsi, sintesis bahan berbasis kalsium, dan teknologi pengolahan limbah yang inovatif.

