

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Congo Red merupakan zat warna azo anionik sintetis yang banyak digunakan dalam industri tekstil, kertas, karet, dan plastik. Zat warna ini bersifat toksik, karsinogenik, mutagenik, dan sangat sulit terdegradasi secara biologis karena memiliki struktur aromatik yang stabil (Oladoye dkk., 2022a). Limbah cair industri yang mengandung *Congo Red* apabila dibuang langsung ke badan air akan menyebabkan penurunan kualitas perairan, menghambat penetrasi cahaya matahari ke dalam kolom air, sehingga mengganggu proses fotosintesis ekosistem akuatik dan menurunkan kadar oksigen terlarut (Oladoye dkk., 2022a). Selain itu, keberadaan *Congo Red* di dalam air minum atau rantai makanan dapat menimbulkan efek genotoksik, mutagenik, dan karsinogenik bagi kesehatan manusia (Oladoye dkk., 2022a). Oleh karena itu, penghilangan *Congo Red* dari limbah cair sebelum dibuang ke lingkungan merupakan hal yang sangat penting dan mendesak.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair, di antaranya koagulasi-flokulasi, membran filtrasi, oksidasi lanjutan, pertukaran ion, dan adsorpsi. Di antara metode tersebut, adsorpsi mendapat perhatian paling luas karena operasinya yang sederhana, efisiensi tinggi, dan biaya yang relatif rendah (Kassa dkk., 2025). Salah satu adsorben yang umum digunakan adalah silika gel, yang memiliki kestabilan termal dan kimia tinggi serta luas permukaan yang besar. Namun demikian, silika gel konvensional umumnya

didominasi oleh pori berukuran mikro (< 2 nm) yang sulit diakses oleh molekul organik berukuran besar seperti zat warna tekstil (Richard dkk., 2024). Selain itu, permukaan silika yang didominasi gugus silanol (Si–OH) cenderung bermuatan negatif pada pH netral, sehingga interaksi elektrostatik dengan zat warna anionik seperti *Congo Red* menjadi lemah dan kapasitas adsorpsinya terbatas (Silviana dkk., 2020a).

Keterbatasan tersebut dapat diatasi dengan melakukan rekayasa pori dan fungsionalisasi permukaan. Rekayasa pori bertujuan untuk memperbesar dan menata struktur mesopori agar molekul besar dapat masuk ke dalam jaringan silika, sedangkan fungsionalisasi permukaan dilakukan untuk memperkenalkan gugus aktif yang dapat meningkatkan afinitas adsorpsi (Silviana dkk., 2020a). Kombinasi kedua metode ini terbukti dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dan kecepatan difusi zat warna, terutama untuk senyawa organik bermuatan anionik.

Salah satu surfaktan yang sering digunakan sebagai agen pembentuk pori adalah *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB). CTAB mampu membentuk micelle dalam larutan yang berfungsi sebagai cetakan bagi terbentuknya struktur mesopori pada silika. Ketika larutan silikat mengalami proses kondensasi di sekitar micelle CTAB, terbentuk kerangka silika berpori teratur yang kemudian menjadi silika mesopori setelah CTAB dihilangkan dengan kalsinasi pada suhu 700°C (Iván Meléndez-Ortiz dkk., 2013).

Selain rekayasa pori, fungsionalisasi gugus aktif juga penting untuk meningkatkan interaksi kimia antara permukaan silika dengan zat warna. Senyawa yang sering digunakan adalah *3-aminopropyltriethoxysilane* (APTES), yang

mengandung gugus amina ($-\text{NH}_2$) yang dapat terprotonasi menjadi $-\text{NH}_3^+$. Gugus ini dapat berinteraksi secara elektrostatik dengan zat warna bermuatan negatif, seperti *Congo Red*, sehingga meningkatkan kemampuan dan selektivitas adsorpsi (de Farias dkk., 2018). Namun, penambahan APTES perlu dioptimalkan melalui variasi konsentrasi karena jumlah gugus amina yang terlalu rendah akan membatasi jumlah situs aktif, sementara konsentrasi yang berlebihan dapat menyebabkan terjadinya aglomerasi molekul silan di permukaan dan penyumbatan pori (*pore blocking*) yang justru menurunkan luas permukaan spesifik dan aksesibilitas zat warna ke dalam pori silika. Oleh karena itu, variasi konsentrasi APTES dilakukan untuk memperoleh keseimbangan antara densitas gugus aktif amina ($-\text{NH}_2$) dengan ketersediaan ruang pori guna mencapai kapasitas adsorpsi yang maksimal terhadap *Congo Red* (de Farias dkk., 2018)

Congo Red sendiri merupakan zat warna anionik dengan dua gugus sulfonat ($-\text{SO}_3\text{H}$) yang membuat molekul ini bermuatan negatif di larutan air. Zat warna ini banyak digunakan di industri tekstil dan diketahui bersifat toksik serta sulit terdegradasi secara biologis. Interaksi antara *Congo Red* dan permukaan silika dimodifikasi APTES terjadi melalui gaya elektrostatik antara gugus $-\text{NH}_3^+$ (pada adsorben) dan gugus $-\text{SO}_3\text{H}$ (pada zat warna) (Hua dkk., 2023). Karena itu, kombinasi CTAB sebagai pengatur pori dan APTES sebagai penyedia gugus aktif diharapkan mampu menghasilkan silika gel termodifikasi dengan performa adsorpsi yang optimal terhadap *Congo Red*.

Selain kinerja adsorpsi, aspek desorpsi juga menjadi pertimbangan penting dalam pengembangan adsorben yang berkelanjutan. Proses adsorpsi pada dasarnya

hanya memindahkan zat warna dari fasa cair ke permukaan adsorben, sehingga adsorben yang telah jenuh berpotensi menjadi sumber pencemar baru apabila tidak dapat diregenerasi (El Messaoudi dkk., 2024). Desorpsi memungkinkan pelepasan *Congo Red* dari permukaan adsorben menggunakan agen eluen yang sesuai, sehingga adsorben dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus tanpa kehilangan kapasitas yang signifikan. Hal ini tidak hanya menekan biaya operasional, tetapi juga mencegah terbentuknya limbah padat baru dari adsorben yang tidak dapat diregenerasi (El Messaoudi dkk., 2024). Dengan demikian, kajian kemampuan desorpsi silika termodifikasi CTAB-APTES terhadap *Congo Red* menggunakan NaOH 1 N sebagai eluen dilakukan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi potensi regenerasi dan ketahanan adsorben pada tiga siklus adsorpsi-desorpsi berulang.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Memperoleh silika gel termodifikasi CTAB-APTES melalui proses sol-gel.
2. Menentukan gugus fungsi dan morfologi permukaan silika gel termodifikasi CTAB-APTES.
3. Menentukan kinerja variasi konsentrasi adsorpsi-desorpsi *Congo Red* pada silika gel termodifikasi CTAB-APTES.