

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industrialisasi yang pesat telah mendorong penggunaan bahan kimia secara tidak terkendali, sehingga menimbulkan limbah cair yang mencemari badan air tanpa melalui proses pengolahan (Bin Mobarak *et al.*, 2023). Salah satu limbah tersebut berasal dari industri cat, kosmetik, dan kertas yang mengandung pewarna kristal violet (KV) dengan rumus kimia $C_{25}H_{30}N_3Cl$. Pewarna ini merupakan senyawa sintetis yang sulit terdegradasi secara alami dan memengaruhi kualitas air karena menghambat proses fotosintesis, mengganggu pertumbuhan biota perairan, serta menimbulkan mikrotoksitas terhadap organisme air (Geetha *et al.*, 2024). Selain itu, KV bersifat karsinogenik dan berbahaya bagi kesehatan manusia karena dapat menyebabkan iritasi pada mata dan kulit serta gangguan pernapasan (Aslam *et al.*, 2023). Oleh karena itu, diperlukan teknik penghilangan limbah yang efektif untuk mengurangi dampak pencemaran serta menjaga kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan (Gul *et al.*, 2023)(Jamarun *et al.*, 2025b).

Berbagai metode telah digunakan untuk menghilangkan zat warna dari larutan air, seperti filtrasi, ozonisasi, elektrokoagulasi, fotokatalisis, degradasi, dan adsorpsi (Dutta *et al.*, 2021). Dari metode tersebut, adsorpsi menjadi pilihan terbaik karena sederhana, efisien, murah, mudah dalam perawatan, dan tidak menghasilkan produk samping beracun (Aslam *et al.*, 2023)(Jamarun *et al.*, 2025a). Hidroksiapatit (HAp), dengan rumus struktural $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ merupakan salah satu material yang sering digunakan sebagai adsorben (Balasooriya *et al.*, 2022). Keunggulan HAp meliputi biokompatibilitas tinggi, kestabilan kimia yang baik, kelarutan yang rendah dalam air, dan sifat tidak beracun, menjadikannya unggul dalam aplikasi biomedis dan lingkungan (Scheverin *et al.*, 2022).

Hidroksiapatit dapat disintesis dari berbagai jenis prekursor, baik yang berasal dari bahan sintetis maupun bahan alam. Penggunaan prekursor sintetis memiliki keunggulan berupa kemurnian yang tinggi dan komposisi yang terkontrol (Firdaus Hussin *et al.*, 2022). Namun, penggunaan bahan alam sebagai prekursor semakin menarik perhatian karena kelebihanannya dalam mendukung keberlanjutan dan ramah lingkungan. Sumber bahan alam tersebut dapat berasal dari cangkang

telur (Muñoz-Sanchez *et al.*, 2023), cangkang kerang bambu (Wulandari *et al.*, 2024), cangkang kerang dara (Jamarun *et al.*, 2023), tulang sotong (Jamarun *et al.*, 2024c), dan kerang simping (Adhitiyan *et al.*, 2024). Dalam penelitian ini sumber prekursor kalsium yang digunakan berasal dari cangkang telur. Cangkang telur diketahui mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) sebesar 92-95% yang dapat dikalsinasi menjadi kalsium oksida (CaO) (Strelec *et al.*, 2023).

HAp memiliki struktur spesifik, kemampuan pertukaran ion, dan afinitas yang baik terhadap berbagai polutan. Namun, reaktivitas permukaan yang tinggi dari partikel HAp dalam larutan menyebabkan kecenderungan untuk mengalami aglomerasi, yang mengurangi luas permukaan aktif dan menurunkan efisiensi interaksi dengan polutan target (Kotnala *et al.*, 2024)(Marrane *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diperlukan modifikasi material, salah satunya melalui penggabungan dengan polimer. Pengkompositan HAp dengan polimer bertujuan untuk untuk membatasi terjadinya aglomerasi sendiri dari nanopartikel HAp, meningkatkan luas permukaan spesifik, memperbanyak situs aktif, serta memperbaiki kinerja adsorpsi terhadap kontaminan berbasis air (Sirajudheen *et al.*, 2020).

Berbagai polimer telah digunakan, seperti PEG (Jamarun *et al.*, 2023), gelatin (Jamarun *et al.*, 2024b), PVA (Abd El-aziz *et al.*, 2017), alginat (Wulandari *et al.*, 2024), kitosan (Jamarun *et al.*, 2024a), dan selulosa (Kotnala *et al.*, 2024). Penambahan polimer seperti alginat atau kitosan terbukti meningkatkan morfologi, homogenitas, dan kapasitas adsorpsi komposit, sebagaimana ditunjukkan oleh peningkatan distribusi partikel dan luas permukaan (Wulandari *et al.*, 2023)(El Kaim Billah *et al.*, 2023). Sejalan dengan temuan tersebut, penelitian ini memilih karboksimetil selulosa (KMS) sebagai polimer pendukung karena kemampuannya dalam meningkatkan kinerja adsorpsi dan regenerasi HAp.

Karboksimetil selulosa (KMS) merupakan turunan selulosa hasil reaksi eterifikasi antara selulosa alami dan asam monokloroasetat dalam media basa (Mohkami and Talaeipour, 2011). KMS adalah polimer polisakarida hidrofilik yang bersifat anionik, larut dalam air, dan memiliki viskositas tinggi, biokompatibel, tidak beracun, *biodegradable*, serta ekonomis, sehingga banyak digunakan dalam berbagai industri (Kukrety *et al.*, 2018)(Zhang *et al.*, 2025)(Han *et al.*, 2024). Dalam sintesis komposit HAp/KMS, KMS berperan penting sebagai agen

pengental dan penstabil yang mengontrol laju presipitasi HAp agar pertumbuhan kristal lebih teratur dan mencegah aglomerasi (Wang *et al.*, 2024). Gugus fungsi hidroksil (-OH) dan karboksil (-COOH) pada rantai KMS berkontribusi dalam proses nukleasi HAp melalui interaksi elektrostatik, ikatan hidrogen, serta kompleksasi ion kalsium (Ca^{2+}), yang memperkuat ikatan antar komponen dalam komposit (Chang *et al.*, 2024). Selain mencegah aglomerasi, penggunaan KMS juga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pembentukan komposit, memperbaiki distribusi partikel, serta menghasilkan struktur pori dan morfologi yang lebih teratur (Hadian *et al.*, 2025).

Untuk memperoleh komposit dengan struktur dan performa optimal, pemilihan metode sintesis menjadi faktor krusial. Beberapa metode sintesis komposit yang umum digunakan diantaranya presipitasi, sol-gel, hidrotermal, dan microwave (Verma *et al.*, 2023). Penelitian ini menggunakan metode sol-gel secara *in-situ*, yaitu pembentukan material langsung dalam medium reaksi melalui transformasi sol ke gel tanpa pemindahan fasa (Behmagham *et al.*, 2024). Metode ini unggul dalam mengontrol morfologi, pencampuran homogen antar prekursor, serta efisiensi dalam integrasi komponen organik dan anorganik (Jamarun *et al.*, 2024a). Jamarun, Amirullah *et al.* (2025) melaporkan bahwa sintesis komposit hidroksiapatit/kitosan secara *in-situ* menghasilkan distribusi partikel seragam dan efisiensi adsorpsi tinggi terhadap logam berat (Jamarun *et al.*, 2025a).

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis komposit berbasis material anorganik dan organik yaitu komposit hidroksiapatit/karboksimetil selulosa (HAp/KMS) dengan menggunakan cangkang telur sebagai sumber prekursor kalsium. Proses sintesis dilakukan menggunakan metode sol-gel secara *in-situ* dengan memvariasikan konsentrasi KMS untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap struktur, kristalinitas, dan morfologi komposit HAp/KMS. Komposit yang dihasilkan akan diuji sebagai adsorben melalui metode adsorpsi *batch*. Konsentrasi KMS yang optimal diharapkan dapat menghasilkan komposit yang efektif dalam menyerap kristal violet dengan mengevaluasi parameter seperti pH larutan, konsentrasi awal KV, waktu kontak, isoterm adsorpsi, kinetika adsorpsi, serta kemampuan penggunaan ulang (*reusability*) untuk memahami kinerja dan efisiensi komposit tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat dirumuskan beberapa permasalahan yaitu:

1. Apakah komposit HAp/KMS dapat disintesis menggunakan metode sol-gel secara *in-situ*?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi KMS terhadap struktur, kristalinitas dan morfologi komposit HAp/KMS?
3. Bagaimana pengaruh pH larutan, konsentrasi awal kristal violet, massa adsorben, dan waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi kristal violet oleh komposit HAp/KMS?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mensintesis komposit HAp/KMS menggunakan metode sol-gel secara *in-situ*.
2. Mengkaji pengaruh variasi konsentrasi KMS terhadap struktur, kristalinitas dan morfologi komposit HAp/KMS.
3. Mempelajari pH larutan, konsentrasi awal kristal violet, massa adsorben, dan waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi kristal violet oleh komposit HAp/KMS.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat dalam mengembangkan pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai sumber kalsium alternatif yang murah, melimpah, dan ramah lingkungan untuk sintesis hidroksiapatit. Selain itu, penggunaan karboksimetil selulosa (KMS) sebagai polimer pendukung dalam komposit HAp/KMS diharapkan mampu meningkatkan struktur pori dan luas permukaan material, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap polutan, khususnya zat warna dalam limbah cair. Dengan demikian, hasil penelitian ini berpotensi menjadi solusi inovatif dan berkelanjutan dalam upaya pengolahan limbah cair industri yang efisien dan ramah lingkungan.