

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan pesat di sektor industri telah memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas hidup masyarakat. Namun, kemajuan tersebut juga diikuti oleh meningkatnya permasalahan lingkungan, terutama terkait pengolahan limbah industri yang berkelanjutan. Industri tekstil merupakan salah satu penyumbang utama limbah cair yang mengandung berbagai polutan berbahaya, seperti zat warna sintetik, senyawa toksik, bahan karsinogenik, serta zat yang sulit terdegradasi secara alami (Brahmi, Agsous, *et al.*, 2025). Apabila tidak diolah dengan tepat, limbah cair ini dapat mencemari lingkungan perairan dan menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia serta keseimbangan ekosistem. Salah satu zat warna yang dihasilkan dari limbah cair industri yang dapat menyebabkan pencemaran air adalah zat warna *Malachite green* (MG) (Majeed *et al.*, 2024).

Malachite green merupakan salah satu zat warna kationik berwarna hijau pekat yang banyak digunakan dalam industri. MG diidentifikasi sebagai turunan trifenilmetana yang larut dalam air dengan rumus molekul $C_{23}H_{25}N_2Cl$ (Makhado, 2025). Zat warna ini digunakan secara luas sebagai pewarna pada industri tekstil, kertas, dan kulit, serta dimanfaatkan sebagai fungisida, pengobatan infeksi protozoa, dan biosida dalam sektor akuakultur. Namun, paparan MG dapat menyebabkan dampak negatif, seperti toksisitas pada sistem pernapasan, mutagenesis, kerusakan kromosom, serta karsinogenesis, dengan sifat yang tidak dapat terurai secara hayati. Untuk mengurangi dampak tersebut diperlukan suatu metode yang efektif yang dapat menghilangkan limbah zat warna berbahaya dari air yang tercemar guna menjaga kesehatan manusia dan ekosistem (Yildirim & Acay, 2025).

Metode yang umum digunakan untuk menghilangkan limbah zat warna adalah metode membran pertukaran ion, adsorpsi, degradasi elektrokimia, oksidasi, fotokatalisis, dan filtrasi (Soufal *et al.*, 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, metode adsorpsi telah diterapkan sebagai solusi efektif dalam pengolahan air limbah karena prosesnya yang sederhana, biaya relatif rendah, serta efisien dalam menghilangkan berbagai jenis zat warna. Efektivitas metode adsorpsi sangat dipengaruhi oleh jenis dan karakteristik material adsorben yang digunakan. Adsorpsi menunjukkan potensi besar dalam menghilangkan zat warna dari larutan dengan memanfaatkan adsorben ramah lingkungan yang mudah diperoleh dari limbah pertanian, industri pangan, dan

sektor kehutanan (Yildirim & Acay, 2025). Adsorben yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya untuk penyerapan zat warna MG yaitu komposit berbasis alumina sintetis/tanah liat yang diaktifkan asam (Soufal *et al.*, 2022), nanokomposit hidrogel silika berbasis karboksimetil selulosa (Makhado, 2025), dan nanokomposit hidrogel karbon-titik metil selulosa-g-poli asam akrilik natrium karboksi (NaCMC-g-PAAc/CDs) (Majeed *et al.*, 2024).

Hidroksiapatit (HAp) merupakan biomaterial berbasis kalsium fosfat dengan rumus kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama sebagai adsorben dalam pengolahan limbah (Jamarun, Prasejati, *et al.*, 2024). Penggunaannya sebagai adsorben didukung oleh sifat kimianya yang khas, seperti kemampuan pertukaran ion, stabilitas termal yang baik, serta afinitas tinggi terhadap berbagai polutan (Ghahremani *et al.*, 2017). Selain itu, HAp juga dikenal memiliki sifat biokompatibel, tidak toksik, dan biodegradable sehingga berpotensi diaplikasikan secara luas dalam bidang biomedis dan lingkungan (Scheverin *et al.*, 2022). HAp juga dapat disintesis dari sumber kalsium alami yang melimpah dan ramah lingkungan, seperti cangkang telur (Vinayagam *et al.*, 2023), cangkang kerang dara (Jamarun, Amelia, *et al.*, 2023), cangkang kerang lokan (Jamarun, Mayasari, *et al.*, 2024), dan tulang sotong (Jamarun, Prasejati, *et al.*, 2024). Dalam penelitian ini, cangkang kerang lokan dipilih sebagai sumber kalsium karena memiliki kandungan kalsium oksida yang tinggi, mencapai 94,626 %, serta berpotensi menghasilkan material adsorben yang berkelanjutan dan bernilai tambah (Jamarun, Mayasari, *et al.*, 2024).

Meskipun HAp menunjukkan potensi yang baik sebagai adsorben, penggunaannya masih menghadapi beberapa keterbatasan. Partikel HAp memiliki energi permukaan yang tinggi sehingga cenderung membentuk aglomerat dalam media cair, yang dapat menurunkan luas permukaan aktif dan kinerja adsorpsi (M. Ibrahim *et al.*, 2020). Selain itu, HAp dapat terdegradasi dalam lingkungan pH asam yang dapat membatasi penggunaannya sebagai adsorben (Behmagham *et al.*, 2024). Untuk mengatasi keterbatasan ini, pengembangan material komposit menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan seperti penggabungan HAp dengan polimer. Pengompositan HAp dengan polimer dilaporkan mampu memodifikasi struktur mikro material, meningkatkan hidrofilisitas permukaan, serta memperluas distribusi pori mikro dan mesopori yang berperan penting dalam proses adsorpsi (Brazdis *et al.*, 2021; Fernando *et al.*, 2021). Pembentukan komposit tidak hanya bertujuan untuk memperbaiki dispersi partikel secara morfologis, tetapi lebih diarahkan pada peningkatan struktur pori internal dan jumlah situs aktif adsorpsi yang dapat

diakses oleh molekul adsorbat dalam larutan (Akartasse *et al.*, 2022; El Kaim Billah *et al.*, 2023). Material komposit HAp dengan polimer yang telah dilakukan yaitu menggunakan polimer kitosan (Jamarun, Prasejati, *et al.*, 2024), PEG (Jamarun, Trycahyani, *et al.*, 2023), alginate (Wulandari *et al.*, 2023), gelatin (Jamarun, Gihwani, *et al.*, 2024) dan karboksimetil selulosa (Abbasi *et al.*, 2020). Dari pengkompositan HAp dan polimer yang telah dilakukan, pada penelitian ini memilih nanoselulosa sebagai polimer yang digunakan.

Nanoselulosa (NC) merupakan salah satu polimer yang dapat digunakan untuk pengomposit karena kekuatan mekanik yang tinggi, luas permukaan yang besar, biokompatibilitas, dan biodegradable untuk berbagai aplikasi (Zhang *et al.*, 2020). NC memiliki banyak gugus hidroksil (-OH) reaktif yang dapat memungkinkan interaksi kuat dengan polutan kationik melalui mekanisme interaksi elektrostatik dan ikatan hidrogen (Mbisana *et al.*, 2024). Integrasi NC ke dalam matriks HAp dilaporkan mampu membentuk struktur komposit dengan pori internal yang lebih berkembang dan meningkatkan hidrofilisitas permukaan, yang berkontribusi terhadap peningkatan luas permukaan spesifik dan memperbaiki kinerja adsorpsi (Melese & Tsade, 2024). Selain itu, reaksi antara HAp dan NC yang terjadi yaitu interaksi antara gugus fosfat dan hidroksil pada HAp dengan gugus hidroksil pada NC berpotensi meningkatkan jumlah situs aktif serta memperkuat mekanisme adsorpsi terhadap zat warna kationik seperti MG (Iswarya *et al.*, 2023).

Pemilihan metode sintesis komposit merupakan bagian yang penting untuk menghasilkan material dengan struktur dan performa optimal. Beberapa metode sintesis komposit yang dapat digunakan yaitu sol-gel, co-presipitasi, hidrotermal, microwave, dan solid state (Verma *et al.*, 2023). Penelitian ini menggunakan metode sol-gel secara *in-situ* yaitu teknik sintesis komposit dengan pembentukan jaringan matriks terjadi secara bersamaan (*in-situ*) dengan pencampuran bahan pendukung atau penguat, sehingga terjadi integrasi yang lebih baik antara fase matriks dan fase penguat. Metode ini diharapkan mampu menghasilkan material komposit dengan struktur pori internal yang optimal untuk proses adsorpsi (Jamarun *et al.*, 2025).

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis komposit berbasis material anorganik dan organik yaitu komposit hidroksiapatit/nanoselulosa (HAp/NC) dengan menggunakan cangkang kerang lokan sebagai sumber prekursor kalsium. Proses sintesis dilakukan menggunakan metode sol-gel secara *in-situ* untuk mendapatkan komposit dengan distribusi partikel seragam. Selain itu, variasi konsentrasi NC dipelajari untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap struktur, kristalinitas, dan morfologi komposit HAp/NC. Konsentrasi NC yang optimal diharapkan dapat menghasilkan

komposit yang efektif sebagai adsorben dalam proses adsorpsi zat warna *Malachite green*. Parameter-parameter adsorpsi seperti pH, konsentrasi awal MG, waktu kontak, isoterm adsorpsi, kinetika adsorpsi, serta kemampuan penggunaan ulang (*reusability*) juga akan dikaji untuk memahami kinerja dan efisiensi komposit.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat dirumuskan beberapa permasalahan yaitu:

1. Bagaimana proses sintesis komposit HAp/NC menggunakan metode sol-gel secara *in-situ*?
2. Apakah variasi konsentrasi NC berpengaruh terhadap struktur, kristalinitas, morfologi, dan karakteristik permukaan komposit HAp/NC?
3. Bagaimana pengaruh pH, konsentrasi MG, dan waktu kontak terhadap kapasitas penyerapan MG oleh komposit HAp/NC?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mensintesis komposit HAp/NC menggunakan metode sol-gel secara *in-situ*.
2. Mempelajari pengaruh variasi konsentrasi NC terhadap struktur, kristalinitas, morfologi, dan karakteristik permukaan dari komposit HAp/NC.
3. Mempelajari pengaruh pH, konsentrasi awal MG dan waktu kontak terhadap kapasitas penyerapan MG oleh komposit HAp/NC.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai pemanfaatan limbah cangkang kerang lokan sebagai sumber kalsium yang ekonomis dan ramah lingkungan. Selain itu, dapat memberikan informasi mengenai penggunaan polimer nanoselulosa (NC) dalam sintesis komposit HAp/NC dapat menghasilkan komposit yang memiliki karakteristik unggul sebagai adsorben untuk mengurangi konsentrasi zat warna dalam limbah cair di lingkungan.