

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pencemaran air merupakan salah satu masalah lingkungan global yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan pesatnya perkembangan aktivitas industri, khususnya industri tekstil yang menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar (Thombre *dkk.*, 2025). Salah satu zat warna yang banyak digunakan adalah *malachite green* (MG), yaitu pewarna kationik dari golongan trifenilmetana yang secara luas diaplikasikan dalam industri tekstil untuk mewarnai serat sintetis maupun alami, serta dalam bidang akuakultur sebagai agen antijamur dan antiparasit pada organisme perairan (Bora *dkk.*, 2024). Senyawa ini memiliki stabilitas kimia yang tinggi, kelarutan yang baik dalam air, serta ketahanan terhadap degradasi alami, sehingga keberadaannya di lingkungan perairan sulit dihilangkan dan berpotensi menimbulkan pencemaran persisten (Cardenas-Flechas *dkk.*, 2026a). Selain bersifat persisten, *malachite green* diketahui memiliki dampak toksik terhadap organisme hidup. Berbagai penelitian melaporkan bahwa senyawa ini bersifat karsinogenik, genotoksik, serta dapat terakumulasi dalam jaringan organisme akuatik sehingga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan melalui rantai makanan (Srivastava *dkk.*, 2004).

Berbagai metode konvensional, seperti koagulasi, filtrasi, adsorpsi, dan pengolahan biologis telah banyak digunakan untuk mengolah limbah zat warna. Namun, metode-metode tersebut umumnya hanya memindahkan polutan dari satu fase ke fase lain tanpa benar-benar mendegradasinya, sehingga berpotensi

menimbulkan pencemaran sekunder (Abhisek *dkk.*, 2025, Donkadokula *dkk.*, 2020). Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang mampu menguraikan senyawa organik secara efektif. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), yang memanfaatkan spesies oksidatif kuat untuk mendegradasi polutan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan relatif tidak berbahaya (Khader *dkk.*, 2024).

Di antara berbagai metode AOPs, fotokatalisis berbasis semikonduktor menjadi pendekatan yang menjanjikan karena mampu memanfaatkan energi cahaya untuk menginisiasi proses degradasi (Balapure *dkk.*, 2024, Minisha *dkk.*, 2024). Pada proses ini, absorpsi cahaya oleh semikonduktor menghasilkan pasangan *electron-hole* (e^-/h^+) yang selanjutnya berpartisipasi dalam pembentukan spesies reaktif oksigen (*Reactive Oxygen Species*, ROS), seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$). Spesies reaktif tersebut berperan dalam mengoksidasi dan mendegradasi polutan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana (Pavel *dkk.*, 2023). Material yang umum digunakan, seperti titanium dioksida (TiO_2), memiliki stabilitas kimia yang baik dan aktivitas fotokatalitik yang tinggi. Namun, nilai celah pita (*band gap*) yang besar ($\sim 3,2$ eV) membatasi aktivitasnya hanya pada radiasi ultraviolet, serta efisiensinya masih terhambat oleh rekombinasi pasangan *electron-hole* (e^-/h^+) yang relatif tinggi, sehingga mengurangi pembentukan ROS dan menurunkan efisiensi degradasi polutan (Abdelfattah dan El-Shamy, 2024). Oleh karena itu, pengembangan material alternatif yang responsif terhadap cahaya tampak dan memiliki efisiensi pemisahan

muatan yang lebih baik menjadi sangat penting (Mohamadpour dan Amani, 2024, Wang *dkk.*, 2025).

Untuk mengatasi keterbatasan TiO_2 , semikonduktor berstruktur spinel menjadi salah satu alternatif yang banyak dikembangkan. Salah satu material yang menjanjikan adalah CuCr_2O_4 , yang menunjukkan potensi untuk aplikasi fotokatalisis dalam pengolahan limbah cair (Cubas *dkk.*, 2020). CuCr_2O_4 merupakan oksida logam berstruktur spinel tipe-p dengan celah pita sekitar 1,7 eV, sehingga dapat diaktivasi oleh cahaya tampak (Kanwal *dkk.*, 2025). Sebagai semikonduktor tipe-p, CuCr_2O_4 memiliki *hole* sebagai pembawa muatan mayoritas yang berperan dalam reaksi oksidasi selama proses fotokatalisis (Koiki dan Arotiba, 2020). Material ini juga memiliki stabilitas termal dan kimia yang baik, yang penting untuk menjaga integritas struktur dan aktivitas fotokatalitik selama proses iradiasi (Ashraf *dkk.*, 2024). Meskipun demikian, kinerja fotokatalitik CuCr_2O_4 murni masih terhambat oleh konduktivitas listrik yang terbatas dan kecenderungan aglomerasi partikel yang mempersempit akses ke situs aktif, sehingga pemanfaatan pembawa muatan kurang optimal dan berdampak pada rendahnya efisiensi degradasi polutan (Tariq *dkk.*, 2025).

Upaya untuk meningkatkan kinerja fotokatalis CuCr_2O_4 dapat dilakukan melalui pengompositan dengan material karbon konduktif, seperti grafena oksida tereduksi (rGO) (Mishra *dkk.*, 2022). Material ini memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, mobilitas elektron yang baik, serta luas permukaan spesifik yang besar, sehingga berpotensi sebagai material pendukung dalam sistem fotokatalitik (Ikram *dkk.*, 2025). Dalam sistem komposit, rGO dapat bertindak sebagai *electron sink*

yang menampung elektron dari pita konduksi CuCr_2O_4 , sehingga menekan laju rekombinasi pasangan *electron-hole*. Sifat konduktif rGO memungkinkan perannya sebagai *electron mediator* yang mempercepat transfer elektron ke molekul target. Struktur π -terkonjugasi pada rGO memungkinkan terjadinya interaksi π - π dengan molekul *malachite green*, sehingga meningkatkan adsorpsi polutan di sekitar situs aktif. Kehadiran lembaran 2D rGO juga efektif mencegah aglomerasi partikel CuCr_2O_4 dan meningkatkan luas permukaan aktif yang tersedia. Kombinasi efek tersebut berpotensi meningkatkan pembentukan ROS dan mengoptimalkan efisiensi degradasi fotokatalitik (Alijani *dkk.*, 2022, Gupta dan Khatri, 2017, Tariq *dkk.*, 2025).

Sejumlah penelitian telah melaporkan bahwa integrasi semikonduktor spinel dengan rGO merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan pemisahan pembawa muatan dan aktivitas katalitik. Tariq *dkk.* (2025) melaporkan bahwa integrasi CuCr_2O_4 dengan rGO menghasilkan komposit dengan luas permukaan yang lebih besar dan transfer elektron yang lebih efisien, sehingga menghasilkan aktivitas yang baik pada proses water oxidation. Kanwal *dkk.* (2025) melaporkan bahwa komposit $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{rGO}$ memiliki luas permukaan aktif lebih besar dan efisiensi degradasi zat warna serta pestisida yang lebih tinggi dibandingkan material tunggal. Selain itu, studi pada sistem spinel lain, seperti $\text{SnMn}_2\text{O}_4\text{-rGO}$ (Narayanan dan Mandal, 2025) dan $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ (P *dkk.*, 2026), juga menunjukkan peningkatan aktivitas fotokatalitik yang signifikan melalui peningkatan transfer elektron, pemisahan muatan, serta pembentukan heterojunction yang lebih efektif dibandingkan material spinel tanpa rGO.

Meskipun demikian, kajian yang secara spesifik membahas sistem komposit $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ masih terbatas. Terutama, studi yang mengevaluasi pengaruh rasio komposisi antara CuCr_2O_4 dan rGO terhadap struktur, morfologi, sifat optik, serta kinerja fotokatalitik, khususnya dalam degradasi *malachite green* di bawah iradiasi cahaya tampak belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara komposisi material, karakteristik yang dihasilkan, dan performa fotokatalitik untuk mengoptimalkan potensi sistem ini..

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi komposit $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ dengan variasi rasio komposisi menggunakan metode hidrotermal, serta mengevaluasi aktivitas fotokatalitiknya terhadap degradasi *malachite green* di bawah cahaya tampak. Integrasi CuCr_2O_4 dengan rGO diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemisahan muatan, memfasilitasi transfer elektron, serta mencegah aglomerasi partikel, sehingga menghasilkan kinerja fotokatalitik yang lebih baik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan material fotokatalis berbasis spinel-karbon yang lebih efisien untuk pengolahan limbah zat warna organik.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Memperoleh material komposit $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ menggunakan metode hidrotermal.

2. Mengkaji pengaruh rasio komposisi CuCr_2O_4 dan rGO terhadap karakteristik material, yang meliputi gugus fungsi, struktur kristal, morfologi permukaan, dan energi celah pita.
3. Menentukan aktivitas fotokatalitik komposit $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ dalam degradasi *malachite green* di bawah iradiasi cahaya tampak.