

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Limbah cair laboratorium merupakan salah satu sumber pencemaran lingkungan yang keberadaannya meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas penelitian di bidang kimia, biologi, dan farmasi. Limbah jenis ini umumnya mengandung berbagai senyawa anorganik, organik, serta ion logam berat yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem perairan maupun kesehatan manusia. Ion logam seperti Fe^{3+} , Cu^{2+} , dan Al^{3+} sering terdapat di dalam limbah, berasal dari penggunaan reagen kimia maupun bahan uji laboratorium. Konsentrasi ion logam yang berlebihan di dalam limbah cair dapat menurunkan kualitas air dan menimbulkan masalah lingkungan. Keberadaan ion logam dapat menyebabkan perubahan warna dan kekeruhan air, membentuk endapan yang mengganggu ekosistem, serta menghambat penetrasi cahaya ke dalam perairan. Kondisi ini berpotensi mengganggu proses fotosintesis organisme air, dan pada akhirnya berdampak pada keseimbangan biota akuatik. Apabila air tercemar ini digunakan oleh manusia, baik secara langsung maupun tidak langsung, maka risiko kesehatan akan meningkat karena adanya akumulasi logam berat dalam rantai makanan (Jaishankar dkk., 2014). Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pemantauan yang efektif dan sensitif untuk mendeteksi keberadaan ion logam dalam limbah cair laboratorium.

Teknik konvensional seperti *atomic absorption spectroscopy* (AAS) dan *inductively coupled plasma–mass spectrometry* (ICP-MS) mampu mendeteksi ion logam dengan sensitivitas tinggi. Namun, kedua metode tersebut membutuhkan

peralatan yang mahal, prosedur preparasi sampel yang kompleks, dan kurang praktis. Sensor berbasis nanomaterial dengan mekanisme deteksi fluoresensi muncul sebagai alternatif yang menjanjikan. Sistem fluoresensi memiliki kelebihan berupa prosedur yang sederhana, waktu respon yang cepat, sensitivitas tinggi, serta potensi untuk digunakan dalam pemantauan kualitas air secara langsung (Hao dkk., 2015).

Salah satu material nanokarbon yang menarik perhatian dalam dekade terakhir adalah *graphene quantum dots* (GQDs). GQDs adalah semikonduktor, memiliki luas permukaan kecil, dan memiliki kapasitas transpor elektron yang tinggi. GQDs memiliki ukuran partikel yang sangat kecil (<10 nm) dengan struktur dasar berbentuk fragmen graphene yang bersifat kuantum. Ukuran nano menyebabkan munculnya *quantum confinement effect* sehingga GQDs menunjukkan sifat optik yang berbeda dari material karbon lainnya, khususnya pada sifat fluoresensinya (Du dan Guo, 2016).

GQDs memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan material nanokarbon lain. Permukaannya kaya akan gugus fungsional seperti $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, dan $-\text{C}=\text{O}$ yang menjadikannya sangat larut dalam medium air serta mudah dimodifikasi secara kimia. Kehadiran gugus ini juga berperan penting dalam fotoluminesensi, karena dapat bertindak sebagai pusat aktif yang meningkatkan rekombinasi radiatif *elektron-hole*. Dengan demikian, GQDs mampu menghasilkan emisi fluoresensi yang kuat dan stabil di bawah penyinaran (Hao dkk., 2015).

Dengan sifat-sifat tersebut, GQDs memiliki prospek luas dalam aplikasi *bioimaging*, fotokatalisis, dan sensor fluoresensi. Dalam konteks sensor,

kemampuan GQDs untuk berinteraksi dengan ion logam melalui gugus fungsional permukaannya memungkinkan terjadinya perubahan intensitas atau pergeseran panjang gelombang emisi fluoresensi. Fenomena ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar deteksi ion logam berbahaya di lingkungan, termasuk pada sistem *biosensing* untuk monitoring limbah cair (Li dkk., 2013). Keunggulan lain GQDs adalah biokompatibilitas, toksisitas yang rendah, serta kemudahan modifikasi permukaan, sehingga cocok untuk aplikasi *biosensing*. Pada penelitian ini, GQDs disintesis menggunakan metode hidrotermal dengan prekursor batang padi. Batang padi mempunyai potensi yang baik untuk menghasilkan *graphene* berkualitas tinggi. karena memiliki nilai gravitasi terbaik dan mempunyai selulosa paling tinggi (Othman dkk., 2024).

Graphene Quantum Dots (GQDs) disintesis menggunakan metode kimia atau fisik, masing-masing dengan pendekatan dan keunggulan berbeda. Metode kimia, seperti proses hidrotermal/solvothermal, oksidasi kimia, pengelupasan kulit elektrokimia, dan sintesis dengan bantuan gelombang mikro, umumnya melibatkan reaksi kimia. Metode ini memberikan kontrol yang baik atas ukuran dan sifat GQDs, namun memerlukan pengaturan yang rumit atau penanganan bahan berbahaya. (Xu dkk., 2023). Metode hidrotermal dipilih karena sederhana, ramah lingkungan, serta mampu menghasilkan GQDs dengan distribusi ukuran seragam dan gugus fungsional yang melimpah (Du dan Guo, 2016). Akan tetapi, metode ini memiliki kelemahan berupa waktu reaksi yang relatif lama, keterbatasan kontrol presisi terhadap ukuran partikel, serta kebutuhan peralatan autoklaf yang tahan tekanan.

Selain nanomaterial berbasis karbon seperti GQDs, material anorganik yang juga banyak dikembangkan adalah hidroksiapatit (HAp, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). HAp merupakan mineral kalsium fosfat yang secara alami ditemukan pada tulang dan gigi manusia, sehingga dikenal sebagai material biokompatibel, bioaktif, dan memiliki kemampuan adsorpsi ion logam yang sangat baik berkat gugus fosfat (PO_4^{3-}) dan hidroksil (OH^-) pada strukturnya. Dalam penelitian ini, HAp disintesis menggunakan metode sol-gel, yaitu metode basah yang memungkinkan terbentuknya partikel berukuran nano dengan kristalinitas tinggi. Keunggulan sol-gel adalah kontrol morfologi yang baik, kemurnian tinggi, dan fleksibilitas untuk menghasilkan material dalam berbagai bentuk (*powder, film, coating*). Namun, sol-gel juga memiliki kekurangan berupa kecenderungan terbentuknya retakan pada saat pengeringan, serta kebutuhan kontrol pH dan suhu yang presisi agar rasio Ca/P mendekati ideal (Dorozhkin, 2012; Sadat-Shojai dkk., 2013).

Integrasi antara GQDs dan HAp dilakukan melalui proses hidrotermal fisik, dengan mencampurkan serbuk HAp, urea, dan batang padi dalam media air. Proses ini memungkinkan terbentuknya HAp yang terdistribusi di permukaan GQDs, sehingga terjadi interaksi sinergis. GQDs menyediakan emisi fluoresensi yang kuat, sedangkan HAp berperan sebagai matriks penyerap ion logam, khususnya Fe^{3+} , yang meningkatkan konsentrasi ion target di sekitar GQDs (Issa dkk., 2020). Mekanisme ini menghasilkan efek *quenching* yang lebih signifikan dan selektif dibandingkan GQDs tunggal. Dengan demikian, GQDs/HAp berpotensi memberikan sensitivitas lebih tinggi dalam mendeteksi Fe^{3+} pada limbah cair. Kelebihan sistem hibrid ini adalah meningkatnya kestabilan fluoresensi,

pengurangan efek aglomerasi GQDs, serta selektivitas yang lebih baik karena HAp memiliki afinitas kuat terhadap ion multivalen. Kekurangannya adalah kemungkinan terjadinya *blocking* eksitasi ketika GQDs tertutup matriks Hap.

Kombinasi hidrotermal dan sol-gel memberikan keuntungan karena relatif murah, sederhana, dan dapat menggunakan bahan alami sebagai prekursor (seperti batang padi). Hal ini membuat penelitian memiliki nilai tambah dalam mendukung konsep *green chemistry*. Setiap material maupun metode sintesis yang digunakan dalam penelitian ini memiliki keunggulan sekaligus keterbatasan. *Graphene quantum dots* (GQDs), misalnya, dikenal memiliki intensitas fluoresensi yang tinggi, kestabilan foton yang baik, serta kelarutan yang tinggi dalam medium berair (Li dkk., 2013). Dalam limbah cair laboratorium yang mengandung campuran ion logam dengan konsentrasi bervariasi, GQDs cenderung kurang selektif sehingga respon deteksinya dapat terpengaruh oleh keberadaan ion lain. Sebaliknya, hidroksiapatit (HAp) merupakan material anorganik dengan kapasitas adsorpsi ion logam yang tinggi karena adanya gugus fosfat dan hidroksil dalam strukturnya, namun HAp tidak menghasilkan sinyal optik yang dapat dimanfaatkan secara langsung untuk deteksi fluoresensi.

Dengan mempertimbangkan karakteristik tersebut, integrasi GQDs dengan HAp memberikan peningkatan sensitivitas sekaligus selektivitas sistem sensor fluoresensi. Kombinasi ini diharapkan tidak hanya meningkatkan sensitivitas, tetapi juga memperbaiki selektivitas *probe fluorescent* dalam mendeteksi ion logam, khususnya Fe^{3+} , pada sistem limbah cair laboratorium yang kompleks. Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi kemampuan

sistem GQDs/HAp dalam mendeteksi ion logam Fe^{3+} pada sampel limbah cair laboratorium. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjelaskan interaksi GQDs-HAp dengan ion logam, sehingga dapat membuka peluang pengembangan sensor fluoresensi berbasis nanomaterial yang lebih praktis, sensitif, dan ramah lingkungan.

I.2 Tujuan penelitian

1. Melakukan sintesis *graphene quantum dots* (GQDs) dari batang padi dengan metode hidrotermal
2. Melakukan sintesis GQDs/Hidroksiapatit dengan metode hidrotermal
3. Mengkaji efektifitas penambahan hidroksiapatit pada GQDs sebagai *probe fluorescent* terhadap ion logam polutan Fe^{3+} dalam limbah cair laboratorium.