

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran merkuri (Hg) merupakan salah satu isu lingkungan global yang cukup serius, terutama akibat aktivitas pertambangan emas skala kecil dan tradisional atau *Artisanal and Small-Scale Gold Mining* (ASGM). Merkuri dimanfaatkan dalam proses amalgamasi pemisahan emas, namun proses ini menghasilkan limbah beracun yang mencemari air dan tanah. Selama proses tersebut, kontak langsung dengan logam merkuri menyebabkan terbentuknya limbah yang mengandung merkuri (Yulis, 2018). Menurut Boerner (2025) yang mengacu pada Konvensi Minamata tentang merkuri di bawah *United Nations Environment Programme* (UNEP), lebih dari 10 juta orang di seluruh dunia terlibat dalam ASGM, dengan emisi merkuri mencapai 1.000 ton per tahun, menyebabkan kerusakan ekosistem dan kesehatan manusia seperti gangguan saraf dan kanker.

Penambang yang bekerja pada sektor ASGM di Indonesia diperkirakan terdapat sekitar 900.000 penambang (Hruschka, 2023), dimana sebagian besar dikategorikan sebagai penambang ilegal yang beroperasi di sekitar 2.645 lokasi pertambangan ilegal yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Kondisi ini menunjukkan bahwa ASGM di Indonesia masih didominasi oleh kegiatan tanpa izin resmi. Kegiatan pertambangan ilegal ini dapat merugikan negara karena tidak memberikan kontribusi dalam bentuk pajak maupun royalti, serta sulit untuk diawasi dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Praktik ASGM ilegal juga sering kali mengabaikan aspek keselamatan kerja dan pengelolaan lingkungan, sehingga meningkatkan potensi paparan langsung bagi penambang maupun masyarakat di sekitarnya (Meutia dkk., 2022).

Berbagai metode konvensional berbasis laboratorium telah banyak digunakan untuk mendeteksi kandungan merkuri dalam air, di antaranya *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), *Inductively Coupled Plasma* (ICP) (Prihatin dkk., 2017), Spektrofotometri (Oyekunle dkk., 2020), dan lain sebagainya. Metode AAS merupakan teknik analisis yang memungkinkan penentuan lebih dari 70 jenis unsur kimia dalam sampel dengan memanfaatkan penyerapan radiasi cahaya oleh atom

bebas (El-Dib dkk., 2020). Metode ICP merupakan teknik analisis *multi-element* yang memanfaatkan plasma untuk deteksi unsur dengan sensitivitas tinggi dalam analisis logam, namun membutuhkan peralatan yang relatif mahal serta prosedur analisis yang kompleks dan memerlukan waktu cukup lama (Senila, 2024). Spektrofotometri UV-Vis merupakan metode yang umum digunakan untuk analisis logam berat dengan menggunakan panjang gelombang *UV* dan cahaya tampak sebagai area serapan untuk mengidentifikasi suatu senyawa (Sahumena dkk., 2020). Metode ini masih memerlukan tahapan preparasi, penggunaan bahan kimia pendukung, serta pengaturan kondisi pengukuran yang terkontrol dan umumnya dilakukan dengan instrumen berukuran besar di laboratorium. Pengembangan sistem deteksi yang lebih aplikatif, terintegrasi, dan portabel menjadi penting untuk mendukung analisis yang lebih efisien, fleksibel, dan adaptif terhadap kebutuhan pengukuran di lapangan (Zhang dkk., 2020). Teknologi berbasis sensor serat optik dikembangkan sebagai solusi alternatif untuk mengatasi keterbatasan berbagai metode konvensional dalam pengujian merkuri.

Sensor berbasis serat optik memiliki sejumlah keunggulan, seperti sensitivitas tinggi, bobot ringan, fleksibel, serta stabil digunakan pada berbagai kondisi lingkungan (Pendão dan Silva, 2022). Berbagai penelitian telah mengembangkan teknologi sensor berbasis serat optik untuk analisis kandungan unsur dalam air. Sensor serat optik berbasis gelombang *evanescent* bekerja dengan memanfaatkan interaksi antara medan *evanescent* yang terbentuk pada permukaan inti serat optik dan lapisan *sensing* yang berada di sekitarnya. Perubahan sifat optik pada lapisan *sensing* akibat interaksi dengan analit (zat target) dapat memengaruhi jumlah energi cahaya pada medan *evanescent* yang diserap, sehingga menyebabkan perubahan intensitas cahaya yang ditransmisikan melalui serat optik. Perubahan intensitas cahaya tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai parameter pengukuran suatu zat (Sharma dkk., 2019).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Rahayu (2019), yang memanfaatkan kitosan sebagai lapisan *sensing* terhadap ion timbal (Pb). Kitosan berperan sebagai adsorben alami yang mampu mengikat ion logam berat melalui mekanisme pertukaran ion. Penggunaan kitosan sebagai lapisan *sensing* masih

memiliki beberapa keterbatasan, khususnya pada aspek selektivitas, karena material ini mampu berinteraksi dengan berbagai jenis ion logam berat. Respons optik yang dihasilkan cenderung terbatas karena perubahan sinyal sepenuhnya bergantung pada modulasi indeks bias di lapisan *cladding*.

Keterbatasan tersebut menunjukkan perlunya pengembangan material *sensing* tambahan yang memiliki kemampuan interaksi lebih selektif terhadap merkuri sehingga dapat menghasilkan perubahan sinyal yang lebih kontras dan stabil pada berbagai rentang konsentrasi. *Dithizone* merupakan *ligan kromogenik* yang banyak digunakan untuk deteksi ion logam berat karena mampu membentuk kompleks berwarna dengan ion logam tertentu seperti merkuri. Pada sensor serat optik berbasis gelombang *evanescent*, perubahan sifat optik lapisan *dithizone* akibat interaksi dengan merkuri dapat memengaruhi intensitas cahaya yang ditransmisikan sehingga memungkinkan proses deteksi secara optik (Bhavsar dkk., 2013). Pemanfaatan reagen *dithizone* sebagai lapisan *sensing* menjadi salah satu alternatif yang berpotensi meningkatkan performa sensor serat optik. *Dithizone* dapat diikat pada permukaan membran dan bereaksi dengan merkuri, menghasilkan perubahan optik terukur yang terkait dengan pembentukan ikatan zat tersebut (Safavi dan Bagheri, 2004). Adanya perubahan sifat optik (berupa perubahan warna dan daya serap cahaya) ini menghasilkan perubahan intensitas cahaya yang jelas pada sensor, sehingga sinyal yang didapat menjadi lebih sensitif dan mudah diukur. Pola sinyal yang beragam tersebut memerlukan metode pengolahan data yang optimal agar perubahannya terbaca dengan tepat. Penerapan metode *machine learning* menjadi solusi efektif untuk membangun model yang mampu memprediksi perilaku objek berdasarkan data tersebut.

Berbagai metode *machine learning* banyak dikembangkan untuk membangun model yang mampu memprediksi perilaku suatu objek atau fenomena berdasarkan data yang tersedia. Salah satu model *machine learning* yang cukup populer dan banyak digunakan dalam klasifikasi ataupun prediksi adalah *random forest*. *Random forest* mampu meningkatkan akurasi klasifikasi dengan membangun kumpulan (*ensemble*) pohon keputusan dan menggabungkan hasil prediksi melalui mekanisme pemungutan suara untuk menentukan kelas yang

paling dominan. Pendekatan tersebut memungkinkan model untuk mengenali pola data yang kompleks, meningkatkan kestabilan prediksi, serta mengurangi risiko kesalahan klasifikasi akibat variasi data masukan (Breiman, 2001).

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi deteksi merkuri yang lebih akurat dan efisien. Pemanfaatan sensor serat optik berbasis lapisan *sensing dithizone* diharapkan mampu mendeteksi keberadaan merkuri secara lebih cepat, sensitif, dan selektif. Pengembangan sistem deteksi yang terintegrasi dengan metode *machine learning* diharapkan dapat meningkatkan akurasi analisis data sensor serta mendukung pemantauan secara lebih optimal, sehingga dapat membantu upaya pengendalian pencemaran merkuri dan melindungi kesehatan masyarakat.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun sistem deteksi konsentrasi merkuri pada limbah pertambangan emas berbasis sensor serat optik. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengkarakterisasi kinerja sensor serat optik *evanescent* yang dimodifikasi dengan lapisan sensitif *dithizone* berdasarkan perubahan intensitas cahaya yang dikonversi menjadi sinyal elektrik.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi alternatif atas keterbatasan teknologi deteksi merkuri konvensional yang cenderung tidak ekonomis, kompleks, dan sulit diimplementasikan pada wilayah pertambangan terpencil. Hal ini penting mengingat merkuri adalah polutan berbahaya yang menurut UNEP bersifat persisten dan mengancam kesehatan manusia melalui rantai makanan.

Secara praktis, sistem ini dirancang untuk mendukung upaya pemantauan pencemaran merkuri secara dini dan berkelanjutan. Adanya alat yang lebih mudah diakses, risiko paparan merkuri terhadap para penambang maupun masyarakat di sekitar kawasan terdampak dapat diminimalkan guna menjaga keberlangsungan kesehatan manusia dan ekosistem.

1.4 Ruang lingkup dan batasan penelitian

1. Sumber cahaya menggunakan laser dioda merah (650 nm) yang terhubung langsung dengan serat optik.
2. Modifikasi lapisan *sensing* serat optik menggunakan matriks kitosan yang dicampur reagen *dithizone* untuk meningkatkan selektivitas terhadap merkuri, dengan variasi pengupasan *cladding* dan diameter pembengkokan (3,5 cm, 4,5 cm, dan 5,5 cm).
3. Pengujian dilakukan pada sampel fase cair dalam media tertutup untuk meminimalkan gangguan cahaya lingkungan.
4. Dataset dibangun menggunakan larutan standar merkuri, sedangkan sampel air sungai dari lokasi tambang emas digunakan sebagai sampel pengujian.
5. Arduino Uno digunakan untuk mengonversi sinyal analog fotodetektor menjadi data tegangan sebagai input sistem.
6. Analisis data dilakukan menggunakan algoritma *machine learning random forest* untuk memprediksi konsentrasi merkuri berdasarkan pola intensitas cahaya yang terdeteksi sensor serta mengklasifikasikan tingkat bahaya pencemaran sesuai kategori yang telah ditentukan.
7. Hasil klasifikasi ditampilkan secara langsung melalui layar LCD, serta dilengkapi dengan *buzzer* sebagai indikator peringatan.

