

BAB I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Air asam tambang (AAT) merupakan limbah cair yang dihasilkan dari aktivitas pertambangan, dengan karakteristik pH yang rendah (bersifat asam) serta kandungan logam berat yang tinggi. Logam besi (Fe) merupakan salah satu komponen dominan dalam AAT yang berasal dari proses oksidasi mineral pirit (FeS_2) dan mineral sulfida lainnya akibat paparan oksigen (O_2) dan air (H_2O) (Bo, 2023; Wang *et al.*, 2025). Proses oksidasi pirit menghasilkan asam sulfat dan ion Fe^{2+} yang teroksidasi menjadi Fe^{3+} . Dalam biogeokimia besi, konversi Fe^{2+} ke Fe^{3+} diikuti presipitasi oksihidroksida besi (Fe oxides) memicu pengasaman melalui hidrolisis Fe^{3+} (pelepasan H^+) serta deoksigenasi perairan (konsumsi O_2), sehingga memperburuk keasaman dan kondisi AAT (Jones *et al.*, 2014).

Pengolahan AAT yang tidak tepat dapat menimbulkan dampak negatif berupa pencemaran perairan dan degradasi ekosistem di sekitar lokasi pertambangan. Logam berat dengan konsentrasi yang tinggi berdampak bagi flora fauna dan terakumulasi dalam tanah yang menyebabkan biomagnifikasi melalui rantai makanan hingga mencapai konsumen puncak (Fernández-Caliani *et al.*, 2019; Tomiyama & Igarashi, 2022). Pada konsentrasi tinggi, besi dapat bersifat toksik bagi organisme hidup dan mengganggu proses biologis (Jie *et al.*, 2025).

Beberapa teknologi pengolahan AAT telah dikembangkan, yang terbagi menjadi dua yaitu metode aktif dan pasif (Said, 2018). Metode aktif memerlukan penambahan bahan kimia secara berkala serta energi listrik untuk operasi pompa

dan filtrasi sehingga biaya operasionalnya relatif tinggi (Iizuka *et al.*, 2022). Sebaliknya, metode pasif salah satunya dengan pemanfaatan bakteri sebagai agen bioremediasi dengan keunggulan ramah lingkungan (Ayilara & Babalola, 2023).

Salah satu pendekatan bioremediasi berbasis mikroorganisme dalam metode pasif adalah bioaugmentasi, yang dilakukan melalui penambahan mikroorganisme potensial ke dalam lingkungan tercemar (Gao *et al.*, 2022). Berdasarkan lokasi pelaksanaannya, bioremediasi dapat dilakukan secara *in situ*, yaitu langsung pada lokasi tercemar, dan *ex situ*, yaitu dengan memindahkan material tercemar ke tempat pengolahan (Veluri *et al.*, 2026). Bioaugmentasi dapat diterapkan pada kedua pendekatan tersebut dengan memanfaatkan mikroorganisme yang memiliki kemampuan dan laju degradasi polutan, sehingga senyawa bersifat persisten atau sulit terurai dapat dihilangkan secara efektif (Nwankwegu *et al.*, 2022). Dibandingkan dengan biostimulasi dan bioventilasi, bioaugmentasi memiliki keunggulan berupa efisiensi degradasi yang lebih tinggi, siklus remediasi yang lebih singkat, serta tingkat adaptabilitas yang luas terhadap berbagai kondisi lingkungan (Kiamarsi *et al.*, 2019).

Bakteri memiliki beberapa mekanisme toleransi dan detoksifikasi logam berat, antara lain biosorpsi, bioakumulasi, serta transformasi yang berperan dalam menurunkan efek toksik logam terhadap sel (Pham *et al.*, 2022). Beberapa strain bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus* spp., *Enterobacter* spp., *Cupriavidus metallidurans* dan *Escherichia* terbukti memiliki kemampuan untuk hidup pada lingkungan dengan konsentrasi logam berat yang tinggi (Alotaibi *et al.*, 2021; Mandal *et al.*, 2021; Pande *et al.*, 2022). Kemampuan tersebut berkaitan dengan

interaksi antara ion logam dan gugus fungsional pada permukaan sel, sehingga bakteri mampu mengikat mengakumulasi atau mentransformasi logam dan mengurangi toksisitasnya (French *et al.*, 2012).

Beberapa penelitian menunjukkan potensi bakteri dalam menurunkan Fe terlarut di lingkungan asam. Singh *et al.* (2018) melaporkan bahwa bakteri autotrofik dari genera *Sphaerotilus*, *Leptothrix*, dan *Clonothrix* spp. mampu mengoksidasi Fe(II) menjadi Fe(III) yang kemudian mengendap sebagai oksida/hidroksida besi. Gupta *et al.* (2018) menganalisis terjadi peningkatan pH dari 3,5 menjadi 6,6 disertai reduksi kadar besi terlarut hingga 50% pada tanah yang tercemar AAT. Sementara itu, Gupta & Sar (2020) berhasil menaikkan pH dari 3,21 menjadi 7,5 menggunakan konsorsium bakteri anaerobik *acid-tolerant* melalui proses reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} , pembentukan presipitat besi sulfida (FeS), dan produksi bikarbonat.

Analisis FTIR (*Fourier-Transform Infrared*) dan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray*) juga telah digunakan untuk memahami mekanisme bakteri dalam mereduksi Fe. Garg *et al.* (2025) mengamati perubahan spektra FTIR pada *Enterobacter* sp. PGRG2 dan *Achromobacter insolitus* PGRG2 setelah terpapar logam berat. Sklute *et al.* (2023) menganalisis perubahan spektra *ferrihydrite* yang direduksi *Desulfovulcanus ferrireducens*. Dopffel *et al.* (2021) dan Fan *et al.* (2022) menggunakan SEM untuk mengamati mineralisasi besi pada permukaan sel *Acidovorax* strain BoFeN1 yang menunjukkan sel tertutup mineral (*encrusted cells*) dengan bentuk *rod-shaped*, *globular*, dan *ring-shaped* (heksagonal).

Berdasarkan penelitian pendahuluan yang telah dilakukan, diperoleh tiga isolat bakteri resisten logam Fe, yaitu IAAT-1, IAAT-2, dan IAAT-3, yang berhasil diisolasi dari kolam pengolahan limbah AAT. Ketiga isolat diuji kemampuan pertumbuhannya pada media *nutrient broth* (NB) dengan penambahan logam Fe pada konsentrasi bertingkat, yaitu 25, 50, 100, 150, 200, dan 250 ppm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketiga isolat mampu tumbuh, yang mengindikasikan resisten Fe. Ketiga isolat bakteri menunjukkan reduksi kadar Fe yang signifikan mencapai 83-85%. Berdasarkan hasil tersebut, ketiga isolat dipilih sebagai isolat potensial untuk aplikasi uji bioaugmentasi pada air asam tambang.

Di Indonesia penelitian bioremediasi AAT menggunakan bakteri telah banyak dilakukan, terutama menggunakan media sintetik untuk mengurangi logam berat. Namun, studi aplikatif bioaugmentasi isolat bakteri lokal resisten besi secara langsung pada sampel AAT asli masih terbatas. Selain itu, karakterisasi mendalam terhadap mekanisme reduksi Fe, termasuk perubahan gugus fungsional (FTIR) dan morfologi sel serta analisis komposisi unsur (SEM-EDX) masih relatif terbatas, sehingga dilakukan penelitian ini dengan rumusan masalah sebagai berikut.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perubahan gugus fungsi berdasarkan analisis FTIR?
2. Bagaimana perubahan morfologi sel isolat bakteri berdasarkan analisis SEM dan komposisi unsur berdasarkan analisis EDX?
3. Bagaimana kemampuan isolat bakteri dalam mereduksi kandungan logam Fe berdasarkan analisis AAS?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis perubahan gugus fungsi berdasarkan analisis FTIR.
2. Menganalisis perubahan morfologi sel isolat bakteri berdasarkan analisis SEM dan komposisi unsur berdasarkan analisis EDX.
3. Menganalisis reduksi kandungan logam Fe pada air asam tambang menggunakan AAS.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini memberikan informasi mengenai kemampuan isolat bakteri resisten logam dalam mereduksi kandungan Fe pada air asam tambang, mengidentifikasi gugus fungsi biomolekul yang berperan dalam interaksi antara bakteri dengan logam Fe, serta menjelaskan perubahan morfologi sel dan komposisi unsur. Sehingga dapat dikembangkan lebih lanjut untuk upaya bioremediasi yang efektif untuk pengolahan air asam tambang dan lingkungan tercemar logam berat.

