

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah Penelitian

Perkembangan pesat sektor industri pada era Revolusi Industri 4.0 telah mendorong peningkatan berbagai aktivitas produksi, termasuk industri tekstil. Peningkatan aktivitas industri tekstil tersebut memberikan dampak terhadap volume limbah cair yang dihasilkan dan dilepaskan menuju lingkungan. Industri tekstil menjadi salah satu penyumbang limbah cair dengan berbagai kandungan bahan kimia berbahaya yang dapat merusak lingkungan perairan dan mengancam keberlanjutan ekosistem.

Setiap tahun, industri tekstil dunia menghasilkan 92 juta ton limbah dan diproyeksikan meningkat hingga 134 juta ton pada tahun 2030. China, Amerika, dan India merupakan produsen limbah terbesar dengan produktivitas industri tinggi guna memenuhi permintaan konsumen (Abtew *et al.*, 2025). Proses pewarnaan tekstil membutuhkan sekitar 150 – 200 liter air untuk 1 kg produk, dimana proses ini menghasilkan 70 – 80% dari total limbah cair (Liu *et al.*, 2024). Limbah cair tekstil dapat dihasilkan dari proses pewarnaan serat kain dengan bahan kimia tertentu untuk menghasilkan warna (Lin *et al.*, 2023), dimana sekitar 10 – 15% pewarna tekstil yang tidak terikat pada serat tekstil akan mewarnai air dan berakhir sebagai limbah cair (Jorge *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024).

Limbah cair tekstil mengandung residu pewarna sintetik yang dapat menyebabkan berbagai masalah ekosistem dan kesehatan manusia. Pewarna tekstil pada perairan mengurangi penetrasi cahaya yang menurunkan laju fotosintesis

organisme autotrof dan meningkatkan aktivitas heterotrofik yang menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut dan memicu eutrofikasi akibat pelepasan bahan organik (Oladoye *et al.*, 2022). Pewarna tekstil dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan seperti iritasi kulit, gangguan pernapasan, gangguan pencernaan, serta risiko mutagenik dan karsinogenik bagi biota perairan dan manusia akibat substitusi kofaktor yang menginaktivasi enzim (Wu *et al.*, 2021; Al-tohamy *et al.*, 2022; Sudarshan *et al.*, 2023; Chellapandian *et al.*, 2024).

Azo merupakan pewarna tekstil yang bersifat mutagenik, karsinogenik, dan genotoksis bagi manusia (Yadav *et al.*, 2021; Goswami *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2024). Salah satu pewarna azo dalam industri tekstil adalah *Congo Red* yang bersifat toksik bagi biota akuatik, tumbuhan, dan manusia karena dapat mengakibatkan masalah kesehatan pada mata, kulit, pernapasan, dan reproduksi (Oladoye *et al.*, 2022; Siddiqui *et al.*, 2023; Brahim *et al.*, 2025). Benzidin yang dihasilkan oleh *Congo Red* dapat menyebabkan alergi dan bersifat karsinogenik melalui inhibisi aktivitas seluler (Siddiqui *et al.*, 2023; Quintanilla-villanueva *et al.*, 2025). Toksisitas *Congo Red* menjadikannya sebagai pewarna berbahaya dengan dampak buruk terhadap kesehatan lingkungan dan makhluk hidup.

Congo Red memiliki efektivitas tinggi, kemudahan penggunaan, dan biaya produksi yang murah, tetapi gugus penarik elektron yang dimiliki sebagai senyawa xenobiotik mengakibatkan *Congo Red* sulit terdegradasi (Alam *et al.*, 2023). Struktur dua ikatan azo ($-N=N-$) yang terhubung dengan cincin benzena dan naftalena memberikan stabilitas tinggi terhadap cahaya, kelembaban, dan proses oksidasi (Netzahual-Lopantzi *et al.*, 2023; Siddiqui *et al.*, 2023; Ghanaim *et al.*, 2025). Sifat resisten menyebabkan *Congo Red* sulit terdegradasi secara alami,

sehingga limbah *Congo Red* dari proses pewarnaan tekstil akan bertahan pada lingkungan dalam jangka waktu yang cukup lama apabila tidak dilakukan penanganan lebih lanjut.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi pencemaran limbah pewarna tekstil dan dampak yang ditimbulkan, meliputi metode fisik, kimia, dan biologis (Tabish *et al.*, 2024; Periyasamy, 2025). Metode fisika dan kimia, seperti adsorpsi, koagulasi, flokulasi, ozonisasi, sistem fenton, katalisis, serta elektrokimia membutuhkan pendanaan yang besar serta menghasilkan lumpur dan produk sampingan yang berbahaya (Aragaw, 2024). Secara biologis, degradasi polutan dilakukan dengan memanfaatkan kemampuan enzimatik mikroorganisme untuk merombak senyawa kompleks menjadi molekul lain yang lebih sederhana (Pinheiro *et al.*, 2022). Metode biologis merupakan alternatif yang lebih efisien dibandingkan metode lain karena lebih hemat biaya dan ramah lingkungan.

Berbagai mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan mikroalga telah dilaporkan memiliki kemampuan mendegradasi pewarna sintetik (Periyasamy, 2025). Di antara berbagai mikroorganisme, bakteri memiliki kemampuan metabolisme dalam mendegradasi surfaktan, logam berat, dan pewarna sintetik pada limbah tekstil (Chellapandian *et al.*, 2024). Bakteri memiliki keunggulan dalam pertumbuhan, fleksibilitas biokimia, dan kemampuan beradaptasi yang baik terhadap lingkungan tercemar, serta metabolisme enzimatik yang beragam dalam mendegradasi limbah (Kishor *et al.*, 2021; Moyo *et al.*, 2022; Pinheiro *et al.*, 2022). Aplikasi bakteri dapat mengefisienkan waktu dan biaya pengolahan, serta mendukung keberlanjutan lingkungan (Periyasamy, 2025).

Bakteri indigenous yang berasal dari lingkungan tercemar limbah tekstil telah beradaptasi dengan keberadaan polutan, sehingga memiliki kemampuan yang lebih tinggi dibandingkan mikroorganisme yang dengan sengaja diintroduksi (Irawati *et al.*, 2021; Moyo *et al.*, 2022; Jia *et al.*, 2024). Adaptasi bakteri terhadap pewarna azo berkaitan dengan aktivitas enzimatis dalam mendegradasi ikatan azo (Khan *et al.*, 2025). Bakteri indigenous turut dilaporkan mampu memanfaatkan polutan sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhannya, sehingga mampu mengurangi polutan pada lingkungan (Aragaw, 2024; Balachandran & Sabumon, 2025). Adanya kemampuan ini mengindikasikan bahwa bakteri indigenous berpotensi untuk digunakan sebagai agens biodegradasi limbah.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa bakteri indigenous yang beradaptasi dengan limbah tekstil memiliki kemampuan biodegradasi pewarna azo yang lebih tinggi dibandingkan introduksi bakteri non-adaptif (Chellapandian *et al.*, 2024). *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas aeruginosa* yang diadaptasikan dengan limbah cair memiliki efektivitas degradasi *Reactive Black B* sebesar 35,68% dan 44,2%, lebih tinggi dibandingkan isolat non-adaptif (30,04% dan 41,73%). Bakteri *Aeromonas hydrophila* SK16 yang diadaptasikan memiliki efektivitas biodegradasi *Yellow F3R* sebesar 90,40% setelah 48 jam inkubasi, lebih tinggi dibandingkan *Aeromonas hydrophila* MTCC 1739 non-adaptif dengan efektivitas sebesar 89,02% setelah 72 jam inkubasi (Srinivasan & Kumar, 2021). Temuan ini menunjukkan adanya potensi bakteri adaptif, termasuk bakteri indigenous sebagai agens biodegradasi limbah tekstil. Bakteri yang telah beradaptasi memiliki kemampuan biodegradasi lebih tinggi akibat kemampuan metabolisme yang berkembang lebih

baik. Eksplorasi lanjutan terhadap jenis bakteri yang efisien dalam melakukan biodegradasi pada suatu wilayah masih dibutuhkan dan penting untuk dilakukan.

Industri tekstil di Provinsi Bali didominasi oleh usaha skala kecil dan rumah tangga yang tidak memiliki sistem pengolahan limbah memadai (Sudarmawan *et al.*, 2020). Limbah cair dari proses pewarnaan dan pencucian tekstil yang mengandung pewarna sintesis berbahaya dibuang langsung menuju perairan, terutama pada Sungai Tukad Badung dan Sungai Tukad Mati yang bermuara menuju Teluk Benoa, dibuktikan dengan adanya akumulasi logam kromium (Cr) dan timbal (Pb) pada badan air, sedimen, serta biota perairan (Sudarmawan *et al.*, 2020; Suteja *et al.*, 2021). Karakteristik Teluk Benoa yang semi tertutup dengan sedimen berlumpur, perairan dangkal, dan arus aliran lemah, menyulitkan pembuangan polutan menuju laut dan mendorong akumulasi limbah pada perairan (Suteja *et al.*, 2020; Suteja *et al.*, 2021; Suteja *et al.*, 2024). Keberadaan ekosistem mangrove dengan sedimen berlumpur yang mengandung berbagai bahan organik dan partikel halus memperkuat akumulasi polutan pada lapisan sedimen teluk (Sudarmawan *et al.*, 2020; Sugiana *et al.*, 2021; As-syakur *et al.*, 2025).

Penanganan permasalahan pencemaran limbah tekstil pada lingkungan perairan berkaitan erat dengan upaya pencapaian pembangunan dan industrialisasi berkelanjutan. Keberadaan limbah cair tekstil di lingkungan perairan menimbulkan berbagai masalah kesehatan dan lingkungan, sehingga memerlukan upaya penanganan. Meskipun beberapa penelitian telah melaporkan potensi bakteri dalam biodegradasi pewarna tekstil, kajian biodegradasi pewarna azo, khususnya *Congo Red* masih terbatas. Hingga saat ini, belum terdapat laporan mengenai kemampuan bakteri indigenous sedimen mangrove Teluk Benoa dalam mendegradasi *Congo*

Red. Penelitian terdahulu lebih berfokus pada biodegradasi mikroplastik dan logam berat kromium. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya dilakukan eksplorasi dan pengujian kemampuan bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa dalam mendegradasi limbah pewarna tekstil *Congo Red*, sebagai alternatif solusi dalam mengembangkan strategi biodegradasi pewarna tekstil berbasis sumber daya hayati lokal yang berkelanjutan.

1.2 Identifikasi Masalah Penelitian

Berdasarkan latar belakang, masalah yang diidentifikasi sebagai berikut.

1. Limbah tekstil yang mengandung pewarna sintetis, termasuk pewarna azo *Congo Red* memiliki sifat toksik yang dapat menurunkan kualitas lingkungan dan menyebabkan berbagai masalah kesehatan bagi makhluk hidup.
2. *Congo Red* memiliki struktur kimia yang stabil dan kompleks sehingga sulit terdegradasi secara alami dan berpotensi mencemari lingkungan dalam jangka waktu yang lama akibat sifat resistensi yang dimilikinya.
3. Industri tekstil skala kecil di Provinsi Bali tidak memiliki sistem pengolahan limbah yang memadai sehingga limbah dibuang secara langsung menuju perairan dan terakumulasi di Teluk Benoa.
4. Kondisi geografis teluk yang semi tertutup, perairan dangkal, aliran arus yang rendah, serta karakteristik sedimen mangrove pada Teluk Benoa menyebabkan polutan tertahan dan terakumulasi pada teluk.
5. Belum terdapat penelitian mengenai potensi bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa dalam mendegradasi *Congo Red*, sehingga isolat bakteri dan persentase degradasi *Congo Red* yang dihasilkan belum diketahui.

1.3 Pembatasan Masalah Penelitian

Pada penelitian ini, permasalahan yang akan diteliti dibatasi sebagai berikut.

1. Penelitian dibatasi pada isolasi bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa sebagai agens biodegradasi *Congo Red*. Bakteri indigenous memiliki potensi biodegradasi *Congo Red*, tetapi masih dibutuhkan informasi lanjutan mengenai isolat bakteri dan potensi biodegradasi yang dimilikinya.
2. Penelitian dibatasi pada biodegradasi dengan menentukan persentase penurunan konsentrasi *Congo Red* oleh isolat bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa. Kemampuan biodegradasi isolat bakteri indigenous berdasarkan persentase penurunan konsentrasi *Congo Red* belum diketahui.

1.4 Rumusan Masalah Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang dipaparkan, permasalahan yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Apakah terdapat isolat bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa yang mampu mendegradasi *Congo Red*?
2. Bagaimanakah perbedaan kemampuan bakteri indigenous dalam mendegradasi *Congo Red* berdasarkan persentase penurunan konsentrasi?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan, tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui isolat bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa yang mampu mendegradasi *Congo Red*.

2. Mengetahui perbedaan kemampuan bakteri indigenous dalam mendegradasi *Congo Red* berdasarkan persentase penurunan konsentrasi.

1.6 Manfaat Hasil Penelitian

1.6.1 Manfaat Teoritis

Manfaat teoritis yang diharapkan dari hasil penelitian adalah sebagai berikut.

1. Hasil penelitian memberikan informasi mengenai kemampuan biodegradasi *Congo Red* oleh bakteri indigenous asal sedimen mangrove Teluk Benoa.
2. Hasil penelitian dapat dimanfaatkan dan digunakan sebagai acuan dan rujukan bagi peneliti lain yang hendak melakukan penelitian sejenis.

1.6.2 Manfaat Praktis

Manfaat praktis yang diharapkan dari hasil penelitian adalah bagi pemerintah, pengelola industri tekstil, dan masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan tercemar limbah, hasil penelitian memberikan solusi yang dapat diterapkan dalam pengelolaan limbah tekstil guna menciptakan lingkungan perairan yang terbebas dari pencemaran limbah tekstil dengan menggunakan biodiversitas alami.