

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai salah satu negara yang memiliki keanekaragaman hayati tertinggi di dunia sehingga sering disebut sebagai negara *megabiodiversity*. Menurut Soetijono (2019), keanekaragaman hayati (*biodiversity*) merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menggambarkan keragaman ekosistem dan berbagai bentuk serta variasi makhluk hidup, baik hewan, tumbuhan, maupun mikroorganisme yang ada di dunia. Keanekaragaman hayati ini dapat mencakup keragaman ekosistem dan habitatnya, jenis atau spesies, dan variasi genetiknya. Menurut *National Geographic Indonesia* (2019), Indonesia menempati peringkat kedua dengan keanekaragaman hayati daratan tertinggi setelah Brazil. Sedangkan keanekaragaman hayati keseluruhan meliputi daratan dan lautan, Indonesia menjadi negara peringkat pertama dengan keanekaragaman hayati tertinggi di dunia.

Keanekaragaman hayati Indonesia yang tinggi dipengaruhi oleh beberapa faktor utama. Secara geografis, Indonesia terdiri dari ribuan pulau dengan iklim tropis yang mendukung kehidupan berbagai spesies. Letak wilayah ini di antara Benua Asia dan Australia membentuk penghalang biogeografi berupa Garis Wallace dan Garis Weber yang menyebabkan tingginya tingkat endemisme serta keunikan spesies di wilayah tersebut (Jupi *et al.*, 2024). Faktor lain seperti variasi iklim, jenis tanah, dan kondisi lingkungan juga berperan dalam

mendukung keanekaragaman hayati yang melimpah di Indonesia (Setiawan, 2022). Keanekaragaman hayati global saat ini menghadapi berbagai ancaman akibat aktivitas manusia, seperti perubahan iklim, pencemaran lingkungan, eksploitasi sumber daya yang berlebihan, dan alih fungsi lahan. Salah satu ekosistem yang paling rentan terhadap ancaman ini adalah ekosistem perairan tawar, yang mengalami degradasi akibat pencemaran dan eksploitasi yang tidak berkelanjutan.

Ekosistem air tawar, seperti sungai, danau, dan lahan basah, sangat rentan terhadap berbagai ancaman, termasuk eutrofikasi, spesies invasif, dan peningkatan suhu akibat perubahan iklim. Pencemaran, eksploitasi berlebihan, dan alih fungsi lahan berkontribusi terhadap percepatan degradasi ekosistem ini sehingga mengancam keanekaragaman hayati dan keseimbangan ekologisnya. Menurut Maclean (2023), habitat air tawar mengalami penyusutan dan perubahan yang semakin cepat seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia, yang diperburuk oleh dampak perubahan iklim global. Krisis keanekaragaman hayati perairan tawar semakin nyata, dimana ikan sebagai salah satu indikator utama yang menunjukkan tingkat kerusakan ekosistem tersebut.

Saat ini, ikan air tawar menghadapi krisis kepunahan yang semakin parah. Sekitar 20% dari seluruh spesiesnya telah punah atau berada di ambang kepunahan, dan jumlah penurunan ini terus bertambah. Maclean (2023) memperkirakan bahwa tanpa adanya tindakan konservasi yang sesuai, sekitar 40 - 50% spesies ikan air tawar akan punah atau mendekati kepunahan di alam

liar pada akhir abad ini. Menurut *International Union for the Conservation of Nature* (IUCN), saat ini diperkirakan ada lebih dari 18.000 spesies ikan air tawar di dunia, atau sekitar 51% dari seluruh ikan yang telah diketahui. Dari 13.276 spesies yang sudah dinilai, hampir 3.000 spesies (23%) masuk dalam kategori terancam punah. Sekitar setengah dari spesies yang dinilai masih banyak populasinya atau tergolong aman masuk dalam kategori *Least Concern* (LC). Sebanyak 2.556 spesies (19%) masuk dalam kategori *Data Deficient* (DD) karena minimnya informasi yang tersedia untuk menilai status konservasinya (Guy *et al.*, 2021). Kurangnya penelitian terhadap spesies yang berisiko punah menjadi penghambat utama dalam upaya perlindungan ikan air tawar. Keanekaragaman ikan air tawar di tingkat global berisiko mengalami penurunan permanen yang sulit dipulihkan akibat kurangnya dukungan riset yang mendalam serta penerapan langkah-langkah konservasi yang tepat, termasuk keanekaragaman ikan air tawar di perairan Bali.

Pulau Bali memiliki luas sekitar 5.637 km² dan merupakan salah satu pusat keanekaragaman hayati akuatik di Indonesia, yang mencakup berbagai kelompok organisme perairan. Status wilayah ini sebagai destinasi wisata utama menyebabkan ekosistem alaminya terus mengalami tekanan akibat aktivitas pariwisata yang semakin intensif. Hampir seluruh wilayah di Bali telah terpengaruh oleh eksploitasi lingkungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, melalui alih fungsi lahan dan eksploitasi sumber daya air yang melebihi daya dukung ekosistem. Salah satu dampak utama dari industri pariwisata adalah alih fungsi lahan yang cepat serta penurunan kualitas air di

berbagai ekosistem perairan tawar, termasuk sungai, danau, dan mata air (Arthana dan As-syakur, 2020).

Kabupaten Buleleng merupakan salah satu kabupaten yang terletak di bagian utara Pulau Bali dan memiliki karakteristik geografis yang didominasi oleh wilayah perbukitan hingga pegunungan, khususnya pada bagian selatan kabupaten. Secara administratif, Kabupaten Buleleng terdiri atas beberapa kecamatan, salah satunya adalah Kecamatan Sukasada, yang berada pada zona transisi antara wilayah dataran tinggi dan dataran rendah. Kondisi topografi Kecamatan Sukasada yang bergelombang hingga curam menyebabkan wilayah ini memiliki banyak alur sungai, mata air, serta air terjun yang terbentuk secara alami akibat perbedaan elevasi. Keberadaan sistem perairan tersebut menjadikan Kecamatan Sukasada sebagai kawasan dengan potensi sumber daya air tawar yang tinggi, sekaligus rentan terhadap perubahan lingkungan akibat aktivitas manusia, seperti pertanian, permukiman, dan pemanfaatan lahan lainnya (Rahman dan Citra, 2018).

Sungai Padang Bulia merupakan salah satu sungai yang mengalir di wilayah Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng, yang secara geografis didominasi oleh bentang alam perbukitan hingga pegunungan dengan kemiringan lereng yang bervariasi. Kondisi topografi tersebut menyebabkan terbentuknya aliran sungai yang berundak serta menghasilkan fitur perairan khas berupa jeram dan air terjun. Keberadaan air terjun di Sungai Padang Bulia menjadikan kawasan ini sebagai objek wisata alam yang sering dikunjungi oleh masyarakat lokal maupun wisatawan, sehingga meningkatkan intensitas

aktivitas manusia di sekitar aliran sungai. Sungai Padang Bulia melintasi wilayah dengan variasi penggunaan lahan, meliputi area pertanian, permukiman, dan jaringan jalan, yang berpotensi memberikan tekanan antropogenik terhadap ekosistem perairan melalui perubahan kualitas air dan kondisi habitat. Selain itu, karakteristik geografis Kecamatan Sukasada yang memiliki curah hujan relatif tinggi serta banyak sumber mata air menjadikan sungai ini berperan penting dalam mendukung keberlanjutan ekosistem perairan tawar dan kebutuhan masyarakat sekitar. Kombinasi antara kondisi geomorfologi, aktivitas wisata air terjun, serta variasi penggunaan lahan di sepanjang aliran sungai menjadikan Sungai Padang Bulia sebagai lokasi yang representatif untuk mengkaji keanekaragaman ikan air tawar sekaligus mengevaluasi efektivitas pendekatan biomonitoring berbasis *environmental* DNA (eDNA) pada ekosistem perairan yang mengalami tekanan antropogenik (Rahman dan Citra, 2018).

Biomonitoring ikan telah menjadi salah satu indikator utama dalam menilai status ekologi perairan, seperti yang diterapkan dalam *European Water Framework Directive* (WFD) (Anggraeni *et al.*, 2024). Metode pemantauan berbasis morfologi sering memerlukan waktu yang lama dan biaya yang tinggi, serta memiliki keterbatasan dalam mendeteksi spesies yang jumlahnya sedikit atau memiliki perilaku tersembunyi. Keterbatasan tersebut menyebabkan efektivitas metode berbasis morfologi menjadi rendah dalam pemantauan keanekaragaman hayati secara menyeluruh. Menurut Pranata *et al.* (2022), biomonitoring ikan sebelumnya masih mengandalkan metode konvensional,

seperti sensus visual bawah air dan survei hasil tangkapan nelayan setempat. Pendekatan ini juga berpotensi memberikan tekanan tambahan (*stressor*) bagi ikan dan biota perairan lainnya akibat paparan aktivitas manusia (*anthropogenic stress*), sehingga diperlukan metode biomonitoring alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti *environmental DNA* (eDNA), yang memungkinkan deteksi spesies tanpa penangkapan atau gangguan langsung terhadap organisme.

Pendekatan eDNA menjadi solusi inovatif dalam pemantauan keanekaragaman hayati, termasuk ikan air tawar, karena memungkinkan deteksi spesies secara non-invasif dan lebih akurat. Metode ini bekerja dengan mengumpulkan materi genetik yang dilepaskan oleh organisme ke lingkungan, seperti air, tanah, atau sedimen, sehingga tidak memerlukan penangkapan langsung terhadap spesies target (Pawłowski *et al.*, 2020). Pengambilan sampel air yang diikuti dengan analisis DNA di dalamnya memungkinkan peneliti mengidentifikasi berbagai spesies dalam suatu ekosistem secara lebih cepat dan efisien dibandingkan metode survei konvensional (Coulter *et al.*, 2019). Keunggulan utama eDNA adalah kemampuannya dalam mendeteksi spesies dengan sensitivitas tinggi, bahkan untuk organisme yang keberadaannya sulit dideteksi melalui metode tradisional. Efisiensi waktu dan biaya yang dimiliki metode ini menjadikannya sebagai alat yang ideal untuk biomonitoring di wilayah dengan akses terbatas atau pada ekosistem yang rentan terhadap gangguan manusia. Salah satu teknik molekuler yang sering digunakan dalam analisis eDNA adalah DNA *metabarcoding*, yang mengandalkan teknologi *high-throughput sequencing* untuk membaca banyak sekuens DNA dari

berbagai spesies dalam satu sampel lingkungan (Liu *et al.*, 2020). Teknik ini memanfaatkan penanda genetik spesifik (*barcode*) untuk mengidentifikasi berbagai spesies dalam satu sampel secara bersamaan. Pemanfaatan teknologi sekuensing seperti *Oxford Nanopore Technology* (ONT) atau *Next Generation Sequencing* (NGS) memungkinkan DNA *metabarcoding* mendeteksi komunitas organisme secara cepat, akurat, dan non-invasif, sehingga sangat efektif untuk biomonitoring keanekaragaman hayati.

Penerapan teknologi *environmental* DNA berbasis *Oxford Nanopore Technology* dalam biomonitoring ikan air tawar di Bali masih terbatas, padahal teknologi ini menawarkan keunggulan berupa analisis *real-time*, fleksibilitas penggunaan, dan efisiensi dalam pemantauan keanekaragaman hayati. Penelitian ini bertujuan menganalisis keanekaragaman ikan air tawar di perairan Bali menggunakan teknologi eDNA berbasis ONT. Meskipun metode eDNA telah digunakan dalam berbagai studi, penerapan ONT masih terbatas di ekosistem perairan tawar Bali yang rentan terhadap tekanan antropogenik. Hasil dari penelitian ini diharapkan menghasilkan data yang akurat dan komprehensif untuk mendukung strategi konservasi dan pengelolaan sumber daya perairan, serta dapat direplikasi di wilayah lain sebagai upaya perlindungan keanekaragaman hayati akuatik secara berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian yang dilakukan yaitu sebagai berikut :

- 1.2.1 Apa saja spesies ikan air tawar yang terdeteksi menggunakan pendekatan *environmental* DNA berbasis *Oxford Nanopore Technology*?
- 1.2.2 Bagaimana tingkat keanekaragaman hayati ikan air tawar di Hulu Sungai Padang Bulia, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali berdasarkan hasil analisis menggunakan pendekatan *environmental* DNA berbasis *Oxford Nanopore Technology*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan di atas, dapat diperoleh tujuan penelitian sebagai berikut :

- 1.3.1 Mengidentifikasi spesies ikan air tawar yang terdeteksi melalui analisis *environmental* DNA berbasis *Oxford Nanopore Technology*.
- 1.3.2 Menganalisis tingkat keanekaragaman hayati ikan air tawar di Hulu Sungai Padang Bulia, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali berdasarkan hasil analisis menggunakan pendekatan *environmental* DNA berbasis *Oxford Nanopore Technology*.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai berikut :

- 1.4.1 Memberikan informasi ilmiah yang akurat dan komprehensif mengenai keanekaragaman hayati ikan air tawar di Bali melalui pendekatan teknologi *environmental DNA* berbasis *Oxford Nanopore Technology*.
- 1.4.2 Menjadi referensi dalam pengembangan metode biomonitoring berbasis *environmental DNA* berbasis *Oxford Nanopore Technology*, khususnya di wilayah perairan tawar Indonesia.
- 1.4.3 Mendukung upaya konservasi dan pengelolaan sumber daya ikan air tawar secara berkelanjutan dengan menyediakan data dasar yang dapat digunakan dalam perumusan kebijakan atau strategi pelestarian biodiversitas akuatik.
- 1.4.4 Mendorong penerapan teknologi sekuensing modern secara luas dalam studi-studi keanekaragaman hayati di berbagai wilayah lain di Indonesia.