

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Biodiversitas yang terjaga memegang peran vital dalam keberlangsungan hidup manusia, terutama melalui fungsinya dalam menyediakan jasa lingkungan. Salah satu contoh nyata terlihat pada ekosistem perairan yang sehat, yang mampu menyediakan sumber daya ikan untuk konsumsi serta menjadi tumpuan mata pencaharian bagi masyarakat sekitar (Iqbal *et al.*, 2022). Namun, penurunan keanekaragaman hayati akibat antropogenik maupun fenomena geologis kini menjadi salah satu ancaman ekologis terbesar yang berdampak langsung pada berkurangnya layanan ekosistem tersebut, termasuk ancaman terhadap ketahanan pangan (Maduppa *et al.*, 2021). Ekosistem perairan seperti danau menjadi salah satu yang paling rentan terhadap tekanan, di mana beberapa danau di Indonesia saat ini mengalami degradasi (Gustiano *et al.*, 2023). Khususnya pada Danau Batur yang diperparah oleh fenomena tahunan *upwelling* belerang yang memicu kematian massal ikan akibat hipoksia (Wiradana *et al.*, 2021). Kondisi tersebut berpotensi menekan populasi spesies asli yang sensitif sekaligus memberi peluang bagi spesies introduksi yang lebih toleran untuk semakin mendominasi.

Upaya konservasi ekosistem perairan secara konvensional banyak dilakukan dengan metode pemantauan dan dokumentasi keanekaragaman hayati ikan yang melibatkan pengamatan atau penangkapan secara

langsung (Yudha *et al.*, 2024). Pendekatan ini mencakup teknik berbasis penangkapan seperti penggunaan jaring, perangkap, electrofishing ataupun metode survei visual bawah air seperti *Underwater Visual Census* (UVC) (Yao *et al.*, 2022; Stat *et al.*, 2019). Namun, berbagai metode tersebut memiliki keterbatasan, diantaranya adalah efisiensi waktu, tenaga, dan hewan yang sukar ditangkap (Levi *et al.*, 2019; Yudha *et al.*, 2024). Menurut Al Malik *et al.*, (2026) metode UVC terbatas dalam cakupan spasial dan temporal serta rentan terhadap bias pengamat. Selain itu, pendekatan konvensional UVC sangat bergantung pada ciri morfologi dan meristik, yang seringkali sulit diinterpretasikan terutama untuk taksa kriptik atau dalam kondisi lapangan yang menantang. Oleh karena itu, dengan berbagai keterbatasan yang ada dibutuhkan pendekatan yang dapat melengkapi dan menjawab tantangan pemantauan biodiversitas yang komprehensif di era modern.

Menjawab berbagai keterbatasan metode konvensional, terdapat pendekatan molekuler yang dapat melengkapi metode konvensional, yakni melalui analisis *environmental* DNA (eDNA) (Spear *et al.*, 2021). Prinsip eDNA memanfaatkan jejak materi genetik yang secara alami dilepaskan oleh organisme ke lingkungan perairan, seperti melalui sekresi lendir, sel kulit yang terkelupas, feses, urin, gamet, atau sisa-sisa dekomposisi tubuh (Barnes & Turner, 2016). Menurut Cahyani *et al.*, (2024) eDNA menawarkan berbagai kelebihan seperti pendekatan tanpa menimbulkan kerusakan lingkungan, karena hanya mengambil material lingkungan

seperti air tanpa menyentuh objek spesies di dalam lingkungan tersebut. Selain itu, eDNA dapat memberikan bias yang relatif kecil dibandingkan dengan metode *visual sensus*, karena hasil eDNA akan disandingkan dengan database (Schadewell *et al.*, 2021). eDNA sebagai alat monitoring, telah diuji dan divalidasi melalui berbagai penelitian eksperimental. Salah satunya adalah studi yang dilakukan oleh Moyer *et al.*, (2014) menggunakan sistem kolam percobaan terkontrol *mesocosm*, yang membuktikan bahwa eDNA mampu mendeteksi kehadiran spesies *Hemichromis letourneuxi* secara spesifik. Selain itu, studi Kelly *et al.*, (2014) juga menunjukkan hasil bahwa pendekatan eDNA *metabarcoding* efektif mampu mengungkap profil keanekaragaman komunitas ikan bertulang sejati dalam ekosistem *mesocosm* berskala 4,5 juta liter.

Pendekatan NGS yang dilakukan dalam eDNA umumnya adalah *amplicon-based approach* atau metode DNA *Metabarcoding* (Cahyani *et al.*, 2024). Menurut Ruppert *et al.*, (2019) eDNA metabarcoding merupakan metode yang cepat dan sensitif untuk mengkaji keanekaragaman hayati melalui penggunaan *high-throughput sequencing* (HTS), yang memungkinkan deteksi DNA dari berbagai spesies menggunakan primer *universal*. Selain itu, penggunaan *Third Generation Sequencing* (TGS) seperti *Oxford Nanopore Technologies* (ONT) MinION dalam analisis eDNA *metabarcoding* memungkinkan pembacaan sekuens molekul tunggal secara *real time* yang menghasilkan sekuens bacaan panjang (*long reads*) hingga puluhan kilobase, yang mampu mengatasi

kelemahan pembacaan pendek (*short reads*) pada teknologi *Next Generation Sequencing* (NGS) seperti Illumina (Hu *et al.*, 2021).

Penerapan metode eDNA sangat krusial untuk mengkaji ekosistem perairan di Indonesia yang menghadapi tekanan, seperti Danau Batur di Bali. Danau Batur merupakan danau terluas di Bali dan telah ditetapkan sebagai satu dari 15 danau prioritas nasional dalam kebijakan Gerakan Penyelamatan Danau (GERMADAN) sejak tahun 2009, yang bertujuan untuk mengendalikan kerusakan dan memulihkan fungsinya (KLHK Bali, 2021). Danau Batur secara alami menjadi tumpuan utama sebagai cadangan air di Bali serta keberadaannya menciptakan ekosistem spesifik di sekitarnya untuk menjaga keberlangsungan daur hidrologi, sehingga UNESCO telah mengakui kawasan Danau Batur sebagai bagian dari Lanskap Budaya Dunia karena peran vitalnya (Putri *et al.*, 2023). Danau Batur merupakan danau kaldera aktif yang terletak pada ketinggian 1.050 meter di atas permukaan laut, dengan luas permukaan mencapai 16,05 km² dan kedalaman maksimum sekitar 60-70 meter (Sentosa & Wijaya, 2013). Namun, saat ini danau Batur sedang menghadapi ancaman degradasi keanekaragaman hayati akibat spesies introduksi yang dapat menimbulkan masalah ekologis (Haryani *et al.*, 2025).

Salah satu permasalahan ekologis utama yang kini dihadapi Danau Batur adalah kehadiran dan dominasi spesies ikan non asli, yang berawal dari kegiatan introduksi untuk tujuan budidaya perikanan sejak tahun 1935. Berbagai jenis ikan seperti nila *Oreochromis niloticus* dan ikan mas

Cyprinus carpio secara sengaja dimasukkan ke dalam ekosistem danau untuk menopang sektor perikanan keramba jaring apung (KJA) (Juliawan *et al.*, 2020). Namun, introduksi tersebut membawa risiko ekologis yang berpotensi mengubah struktur komunitas ikan asli secara drastis (Dubreuil *et al.*, 2022; Ohee *et al.*, 2018). Data Sentosa & Wijaya (2013) pada tahun 2013 menunjukkan populasi ikan masih didominasi oleh ikan nila sebesar 63% dan Midas cichlid (*Amphilophus citrinellus*) 0,4% dari total populasi. Berdasarkan Gustiano *et al* (2023) populasi Midas cichlid telah meledak hingga mencapai 60%, sementara populasi ikan nila menurun drastis menjadi hanya 20%. Pergeseran drastis ini mengindikasikan adanya gangguan serius pada komposisi dan keseimbangan komunitas ikan di Danau Batur, yang berpotensi mengancam keberadaan spesies asli yang lebih rentan. Hal tersebut disebabkan tekanan dari spesies introduksi yang mendominasi tidak hanya berdampak pada penurunan jumlah individu, tetapi juga berpotensi menyebabkan erosi genetik pada populasi ikan asli yang tersisa. Penurunan variasi genetik ini dapat melemahkan kemampuan adaptasi spesies asli terhadap perubahan lingkungan, sehingga meningkatkan risiko kepunahan lokal di masa mendatang. Selain itu, kurangnya data akurat mengenai status dan sebaran seluruh spesies introduksi di Danau Batur, ditambah dengan ledakan populasi Midas cichlid berdasar penelitian sebelumnya, menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk melakukan deteksi dini dan pemetaan komprehensif terhadap seluruh spesies ikan (Katsanevakis *et al.*, 2014).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

- 1.2.1. Bagaimana keanekaragaman spesies ikan air tawar yang berada pada ekosistem danau Batur, Bali melalui teknik eDNA *metabarcoding* menggunakan gen MiFish 12S *Universal*?
- 1.2.2. Spesies ikan introduksi apa saja yang teridentifikasi di ekosistem Danau Batur berdasarkan analisis eDNA *metabarcoding*?

1.3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah, didapatkan tujuan penelitian sebagai berikut:

- 1.3.1. Mengkaji keanekaragaman ikan air tawar pada ekosistem danau Batur, Bali melalui teknik eDNA *metabarcoding* menggunakan gen MiFish 12S *Universal*.
- 1.3.2. Mendeteksi keberadaan spesies ikan introduksi di Danau Batur berdasarkan identifikasi taksonomi dari hasil analisis eDNA *metabarcoding*.

1.4. Manfaat

Penelitian memberikan manfaat berupa kajian mengenai keanekaragaman spesies ikan air tawar dan invasif dengan menggunakan pendekatan eDNA dan *Oxford Nanopore Technologies* sebagai upaya konservasi ekosistem Danau Batur.