

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Plankton merupakan komponen fundamental dalam ekosistem perairan karena berperan sebagai produsen primer yang menopang jejaring trofik, yaitu struktur hubungan makan–dimakan yang mengatur aliran energi dan materi antarorganisme di lingkungan akuatik (Brierley, 2017; Basu and Mackey, 2018; Santhanam et al., 2019). Fitoplankton menghasilkan biomassa melalui proses fotosintesis dan berkontribusi signifikan terhadap produksi oksigen, sehingga perubahan komposisi dan kelimpahan plankton dapat berdampak langsung pada stabilitas ekosistem perairan laut maupun perairan darat (Basu and Mackey, 2018). Selain itu, plankton bersifat sangat peka terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti suhu, stratifikasi perairan, dan masukan nutrien, sehingga sering dimanfaatkan sebagai indikator dini dalam pemantauan kualitas perairan dan dinamika ekosistem (Soeprbowati et al., 2021; Soeprbowati and Jumari, 2022). Oleh karena itu, identifikasi plankton yang akurat dan konsisten menjadi kebutuhan mendasar dalam penelitian oseanografi, pemantauan lingkungan, serta pengambilan keputusan pengelolaan sumber daya perairan.

Urgensi identifikasi plankton semakin meningkat seiring dengan bertambahnya frekuensi kejadian *Harmful Algal Blooms (HABs)*, yaitu ledakan populasi mikroalga tertentu yang dapat menurunkan kualitas perairan, memicu kematian biota, serta menimbulkan kerugian ekonomi dan risiko kesehatan (Anderson et al., 2012; Rolton et al., 2022). Berbagai studi menunjukkan bahwa kejadian HABs dipengaruhi oleh kombinasi faktor iklim dan aktivitas manusia, termasuk pemanasan perairan, perubahan pola sirkulasi, eutrofikasi, serta peningkatan masukan nutrien dari daratan ke wilayah pesisir (Gobler, 2020; Griffith and Gobler, 2020; Rodríguez-Benito et al., 2020). Meskipun teknologi pemantauan perairan terus berkembang, penentuan spesies penyebab HABs dan analisis komposisi komunitas plankton tetap sangat bergantung pada identifikasi taksonomi yang presisi dan andal.

Tantangan identifikasi plankton menjadi semakin kompleks pada wilayah

tropis yang umumnya memiliki tingkat keanekaragaman hayati tinggi serta variasi komunitas yang besar secara spasial dan temporal (Tang et al., 2018; Rachman et al., 2021). Di banyak wilayah tropis, keterbatasan basis data terintegrasi serta jumlah pakar taksonomi yang terbatas menyebabkan proses identifikasi manual berbasis mikroskop memerlukan waktu lama dan berpotensi menghasilkan perbedaan penilaian antar-pengamat. Kondisi ini diperparah oleh kemiripan morfologi antarspesies plankton serta variasi bentuk dalam satu spesies, sehingga identifikasi manual sering kali sulit dilakukan secara konsisten (Culverhouse et al., 2006; Prakasa et al., 2021; Eerola et al., 2024). Akibatnya, terdapat kesenjangan yang nyata antara kebutuhan pemantauan plankton yang cepat dan berkelanjutan dengan kemampuan identifikasi konvensional yang tersedia saat ini.

Perkembangan *deep learning* membuka peluang baru untuk mengotomatisasi proses identifikasi plankton melalui pemanfaatan citra mikroskopik. Pendekatan ini memungkinkan model mempelajari representasi visual berupa bentuk, tekstur, dan pola internal secara langsung dari data, tanpa bergantung sepenuhnya pada perancangan fitur manual, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi analisis dan konsistensi hasil (Lumini et al., 2020; Li et al., 2021; Ardhi et al., 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa model berbasis *convolutional neural networks* dan detektor objek modern telah digunakan secara luas dalam klasifikasi dan deteksi plankton karena kemampuannya menangani variasi ukuran dan bentuk objek (Irisson et al., 2022; Bachimanchi, 2024). Namun demikian, sebagian besar studi masih dilakukan pada dataset dengan kondisi pencitraan yang relatif homogen atau jumlah data yang memadai, sehingga performa model cenderung menurun ketika diterapkan pada konteks berbeda, khususnya pada wilayah tropis dengan data terbatas dan distribusi kelas yang tidak seimbang (Ardhi et al., 2022; Nardelli et al., 2022; Yue et al., 2023).

Selain keterbatasan data, identifikasi plankton berbasis citra mikroskopik juga menghadapi tantangan teknis yang bersifat *fine-grained*. Citra plankton sering memuat lebih dari satu objek dalam satu bidang pandang, memiliki variasi skala objek yang signifikan, serta menampilkan kualitas tekstur internal yang tidak selalu stabil, terutama pada mode mikroskopi *phase contrast*. Pada kondisi tersebut, model deteksi kerap menghadapi *trade-off* kinerja, misalnya peningkatan ketelitian prediksi yang diikuti oleh penurunan sensitivitas terhadap objek kecil atau objek dengan kontras rendah. Tantangan ini menunjukkan bahwa penguatan fitur lokal saja tidak selalu cukup, dan perlu diimbangi dengan pemodelan konteks global agar ambiguitas antarkelas dapat ditekan secara lebih terukur.

Pada ranah deteksi objek, model satu tahap seperti YOLO banyak digunakan karena mampu memberikan keseimbangan yang baik antara akurasi dan efisiensi komputasi, sehingga sesuai untuk aplikasi pemantauan yang memerlukan kecepatan inferensi tinggi dan alur deteksi satu-tahap yang praktis untuk implementasi (Ren et al., 2017; Zhang et al., 2024). Perkembangan arsitektur mutakhir juga menunjukkan kecenderungan integrasi mekanisme perhatian dan Transformer untuk meningkatkan pemahaman konteks global tanpa mengabaikan detail lokal, terutama pada objek berukuran kecil, saling tumpang tindih, atau berada pada latar yang kompleks (Dosovitskiy et al., 2021). Meskipun demikian, penerapan pendekatan hibrida antara konvolusi dan Transformer untuk identifikasi plankton tropis dengan kondisi data terbatas serta kemiripan morfologi antarspesies masih relatif terbatas dan belum dievaluasi secara komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan pendekatan deteksi plankton berbasis *deep learning* dengan mengintegrasikan *Asymmetric Convolution (AC)* dan *Vision Transformer (ViT)* dalam kerangka detektor modern. AC dimanfaatkan untuk memperkuat ekstraksi fitur lokal seperti tepi dan bentuk halus yang relevan dengan morfologi plankton, sedangkan ViT digunakan untuk menangkap hubungan global antarbagian objek yang membantu membedakan spesies dengan kemiripan lokal yang tinggi. Integrasi kedua komponen ini dirancang untuk menyeimbangkan kebutuhan akan ketelitian identifikasi dan efisiensi komputasi pada konteks plankton tropis. Evaluasi dilakukan pada dataset citra mikroskopik plankton tropis yang dikurasi dan dianotasi secara konsisten untuk mendukung pengujian detektor pada kondisi *fine-grained*. Selain itu, hasil deteksi diperkaya melalui integrasi *Large Language Models (LLM)* untuk menghasilkan deskripsi semantik spesies dan ringkasan informasi berbasis hasil deteksi, sehingga sistem yang dikembangkan tidak hanya memberikan label dan lokasi objek, tetapi juga menyediakan ringkasan deskriptif untuk membantu interpretasi hasil, tanpa menggantikan proses deteksi berbasis model.

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi plankton pada citra mikroskopik merupakan tahapan penting dalam pemantauan ekosistem perairan, kajian biodiversitas, dan analisis dinamika komunitas. Namun, identifikasi manual masih menghadapi keterbatasan dari sisi kecepatan, konsistensi, dan keterulangan hasil. Proses berbasis pengamatan mikroskop memerlukan keahlian taksonomi yang tinggi dan waktu analisis yang

panjang, serta rentan terhadap perbedaan penilaian antar-pengamat, terutama ketika citra menampilkan variasi morfologi yang halus, variasi ukuran objek yang beragam, dan lebih dari satu objek plankton dalam satu bidang pandang. Kondisi tersebut meningkatkan beban kerja dan berpotensi menurunkan reliabilitas data yang dibutuhkan untuk penelitian maupun pengambilan keputusan.

Pendekatan berbasis *deep learning* berpotensi mengotomatisasi proses deteksi dan identifikasi plankton melalui pembelajaran langsung dari pola visual citra. Akan tetapi, penerapan pada citra plankton mikroskopik tropis masih menghadapi tantangan khusus. Pertama, detektor berbasis *convolutional neural networks* (CNN) umumnya efektif menangkap fitur lokal seperti tepi, bentuk, dan tekstur, namun pada masalah *fine-grained* kinerjanya dapat kurang stabil ketika pembeda antarspesies ditentukan oleh kombinasi detail lokal dan hubungan struktur secara menyeluruh. Kedua, *Vision Transformer* (ViT) mampu memodelkan konteks global dan relasi antarbagian objek, tetapi integrasi yang tidak tepat dapat meningkatkan kompleksitas arsitektur dan beban komputasi sehingga menurunkan efisiensi inferensi. Ketiga, karakter dataset plankton pada konteks riil sering bersifat data-terbatas dan tidak seimbang antar kelas, serta memuat citra multi-objek, sehingga model berisiko bias terhadap kelas dominan dan mengalami penurunan reliabilitas pada kelas minor atau pada kondisi objek saling berdekatan.

Selain tuntutan kinerja deteksi, keluaran model perlu bersifat informatif agar hasilnya mudah dipahami dan dapat digunakan secara lebih luas. Keluaran detektor umumnya terbatas pada label kelas dan *bounding box*, sedangkan pengguna sering membutuhkan ringkasan yang menjelaskan hasil deteksi secara lebih semantik, misalnya ciri morfologi umum atau deskripsi spesies secara ringkas. Oleh karena itu, interpretasi semantik berbasis *Large Language Models* (LLM) diposisikan sebagai pascaproses untuk menyajikan keluaran deteksi secara lebih mudah dipahami, tanpa mengubah fokus utama penelitian pada pengembangan arsitektur deteksi.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini merumuskan permasalahan utama sebagai berikut:

Bagaimana mengembangkan model deteksi plankton berbasis *deep learning* melalui integrasi *Asymmetric Convolution* (AC) dan *Vision Transformer* (ViT) yang mampu meningkatkan kinerja deteksi pada citra mikroskopik plankton tropis yang bersifat *fine-grained* dengan

tetap menjaga efisiensi komputasi, serta bagaimana menyajikan hasil deteksi tersebut dalam bentuk ringkasan interpretasi semantik yang ringkas dan mudah dipahami melalui *Large Language Models* (LLM) sebagai tahap pascaproses.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan memvalidasi metode deteksi plankton berbasis *deep learning* yang mengintegrasikan *Asymmetric Convolution* (AC) dan *Vision Transformer* (ViT) untuk meningkatkan kinerja deteksi pada citra mikroskopik plankton tropis yang bersifat *fine-grained* dengan tetap menjaga efisiensi komputasi, serta menghasilkan ringkasan interpretasi semantik berbasis *Large Language Models* (LLM) sebagai tahap pascaproses untuk mendukung pemahaman pengguna.

1.5 Kebaruan (Novelty)

Kebaruan penelitian ini adalah pengembangan metode deteksi plankton berbasis *deep learning* yang mengintegrasikan *Asymmetric Convolution* (AC) dan *Vision Transformer* (ViT) dalam satu arsitektur detektor untuk citra mikroskopik plankton tropis yang bersifat *fine-grained*, sehingga penguatan fitur lokal dan pemodelan konteks global dapat bekerja secara komplementer dengan tetap mempertahankan efisiensi komputasi pada proses inferensi.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah pada pengembangan deteksi objek untuk citra mikroskopik dengan menunjukkan, secara empiris, rasionalitas dan dampak integrasi fitur lokal dan konteks global dalam satu arsitektur. Hasil penelitian menyediakan bukti empiris mengenai hubungan antara desain arsitektur (AC+ViT), kinerja deteksi, serta karakteristik data (data-terbatas, tidak seimbang, dan multi-objek) pada konteks identifikasi plankton, sehingga memperkuat pemahaman tentang faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan deteksi pada skenario *fine-grained*.

Manfaat Metodologis

Penelitian ini menyediakan kerangka metodologis yang *reproducible* dan dapat direplikasi untuk penelitian serupa, mencakup penyiapan data, strategi augmentasi, rancangan eksperimen, serta evaluasi yang menggabungkan indikator kinerja deteksi dan efisiensi komputasi. Kerangka ini membantu memastikan bahwa performa model tidak hanya baik secara metrik, tetapi juga layak dari sisi kompleksitas arsitektur dan kebutuhan komputasi, sehingga dapat menjadi acuan perancangan eksperimen pada domain citra mikroskopik lainnya.

Manfaat Praktis

Penelitian ini berpotensi mendukung otomasi deteksi plankton yang lebih konsisten untuk kebutuhan laboratorium dan pemantauan perairan. Pascaproses berbasis LLM dapat membantu menyajikan hasil deteksi dalam bentuk ringkasan semantik yang lebih mudah dipahami dan dapat dimanfaatkan sebagai dukungan komunikasi hasil, dokumentasi, maupun pengambilan keputusan berbasis citra secara lebih informatif.

1.7 Pembatasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian dan ketepatan ruang lingkup, batasan penelitian ditetapkan sebagai berikut:

1. Objek penelitian dibatasi pada plankton yang direpresentasikan pada dataset citra mikroskopik yang digunakan, termasuk spesies yang telah ditetapkan dalam penelitian.
2. Penelitian berfokus pada tugas deteksi objek (lokalisasi *bounding box* dan klasifikasi kelas), termasuk skenario citra yang memuat lebih dari satu objek dalam satu frame, bukan segmentasi instans, rekonstruksi 3D, maupun estimasi kelimpahan.
3. Integrasi AC dan ViT merupakan fokus utama pengembangan arsitektur; pembahasan mengenai modifikasi *loss function*, *knowledge distillation*, *continual learning*, atau *active learning* tidak menjadi ruang lingkup utama penelitian.
4. LLM digunakan pada tahap pascaproses untuk interpretasi semantik

hasil deteksi; LLM tidak digunakan untuk melatih model deteksi, tidak memodifikasi bobot model, dan tidak menjadi komponen penentu kinerja deteksi, serta dikendalikan melalui *prompt* dan konfigurasi inferensi yang ditetapkan.

5. Evaluasi efisiensi komputasi dibatasi pada metrik umum seperti jumlah parameter, FLOPs, ukuran model, dan waktu inferensi pada perangkat atau lingkungan uji yang digunakan; kajian *deployment* pada perangkat *edge* secara mendalam tidak dibahas.

1.8 Sistematika Penulisan

Disertasi ini disusun dalam lima bab. Bab I Pendahuluan memuat identifikasi masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, kebaruan, manfaat, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab II Kajian Pustaka dan Landasan Teori membahas konsep plankton dan citra mikroskopik, dasar deep learning untuk analisis citra, deteksi objek berbasis YOLO, konsep Asymmetric Convolution dan Vision Transformer, serta evaluasi kinerja dan efisiensi model. Bab III Metodologi Penelitian menjelaskan dataset dan penyiapan data, rancangan arsitektur integrasi AC dan ViT, prosedur pelatihan dan validasi, mekanisme evaluasi, serta pascaproses interpretasi semantik berbasis LLM. Bab IV Hasil dan Pembahasan menyajikan hasil eksperimen serta analisis perbandingan kinerja dan efisiensi komputasi. Bab V Kesimpulan dan Rekomendasi merangkum capaian penelitian, keterbatasan, dan rekomendasi pengembangan penelitian selanjutnya.