

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri pertanian Indonesia memiliki peran strategis dalam mendukung perekonomian nasional, khususnya pada sektor hortikultura yang menjadi salah satu komponen penting dalam rantai pasok pangan dan perdagangan komoditas pertanian di kawasan Asia Tenggara [1]. Berdasarkan kajian Bappenas dan FAO, buah dan sayuran merupakan penyumbang terbesar kehilangan pangan (*food loss*) di Indonesia dengan estimasi mencapai 115–184 kg per kapita per tahun, yang berdampak pada potensi kerugian ekonomi nasional sebesar Rp213–Rp551 triliun per tahun [2]. Di antara berbagai komoditas hortikultura tersebut, pisang, mangga, dan pepaya termasuk buah tropis dengan tingkat produksi dan konsumsi yang tinggi di Indonesia serta memiliki nilai ekonomi penting dalam pasar domestik maupun perdagangan regional Asia Tenggara[1]. Ketiga jenis buah ini dipilih karena termasuk komoditas hortikultura yang bersifat mudah rusak dan sangat dipengaruhi oleh kondisi penanganan pascapanen. Produk hortikultura memiliki kadar air tinggi dan tetap mengalami aktivitas fisiologis setelah dipanen, sehingga rentan mengalami penurunan kualitas dan pembusukan apabila tidak ditangani dengan baik[3]. Tingginya *food loss* pada buah tropis ini terutama disebabkan oleh sifatnya yang mudah rusak serta ketidaktepatan penanganan dan penentuan tingkat kematangan pada tahap pascapanen[4]. Pada tahap pascapanen, buah-buah ini mengalami perubahan fisiologis dengan warna, tekstur, dan kekerasan yang progresif, sehingga penentuan tingkat kematangan yang akurat menjadi faktor kritis untuk mempertahankan kualitas produk[5]. Kesalahan dalam penentuan kematangan berdampak langsung yaitu buah yang dipetik terlalu muda tidak mencapai rasa manis yang optimal ketika sampai ke pasar, sementara buah terlalu matang cepat rusak saat distribusi. Masalah ini mengganggu stabilitas pasokan untuk pasar ekspor dan industri pengolahan yang memiliki persyaratan kematangan ketat dan berbeda [6].

Penanganan pascapanen buah-buahan tropis dilaporkan mengakibatkan kehilangan hasil (*food loss*) yang signifikan, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia dimana teknologi penanganan masih terbatas[4]. Penelitian

menunjukkan bahwa *postharvest loss* di Indonesia dapat mencapai 44% dengan kerugian senilai USD 4,653 juta per tahun, mayoritas disebabkan oleh kesalahan penentuan tingkat kematangan saat sortir yang berdampak pada kualitas sensori dan stabilitas pasokan ekspor [7]. Pada kenyataannya, sistem pengendalian kualitas yang terukur dan konsisten masih menjadi tantangan utama, terutama karena ketergantungan yang tinggi pada pengalaman subjektif tenaga kerja manual [8]. Karena itu, berbagai studi mendorong pengembangan teknologi otomatis untuk klasifikasi tingkat kematangan sebagai cara yang efektif untuk mengurangi *food loss* dan meningkatkan efisiensi rantai pasok buah tropis[6].

Proses pengendalian kualitas dan klasifikasi tingkat kematangan buah pada saat ini masih didominasi oleh pengamatan visual manual yang bergantung sepenuhnya pada pengalaman dan persepsi individual pekerja dan Metode manual ini bersifat sangat subjektif, tidak konsisten antar evaluator, dan rentan terhadap kesalahan penilaian, terutama ketika volume buah yang ditangani sangat besar di skala industri [9]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem inspeksi berbasis *computer vision* mampu meningkatkan secara signifikan kecepatan pemrosesan, konsistensi hasil penilaian, dan kemampuan bekerja secara *real-time* dalam lingkungan industri buah yang dinamis. Dengan demikian, pengurangan kesalahan dalam proses sortasi dan *grading* dapat secara langsung menurunkan kerugian finansial akibat buah berkualitas rendah dan memperpanjang daya simpan produk di pasar [9].

Pendekatan berbasis *deep learning*, khususnya *Convolutional Neural Network* (CNN), telah banyak digunakan pada *fruit quality classification* dan dilaporkan mampu mencapai akurasi di atas 90% untuk klasifikasi tingkat kematangan, sekaligus mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual dalam proses sortasi buah [10]. Namun, CNN pada dasarnya mengekstraksi pola lokal melalui operasi konvolusi sehingga kurang optimal dalam menangkap hubungan spasial global antar *region* citra, terutama ketika kondisi pencahayaan dan bentuk buah sangat bervariasi[11]. Keterbatasan ini mendorong eksplorasi arsitektur yang lebih mampu memodelkan konteks global, salah satunya *Vision Transformer* (ViT) yang mengadaptasi mekanisme *self-attention* dari pemrosesan bahasa alami untuk domain *computer vision*. Dalam ViT, citra dibagi menjadi *patch* berukuran tetap

(misalnya 16×16 piksel) yang diperlakukan sebagai *sequence* dan diproses oleh blok *self-attention* sehingga setiap *patch* dapat berinteraksi dengan seluruh bagian citra secara paralel[12]. Studi pada klasifikasi tingkat kematangan kakao menunjukkan bahwa ViT mampu memodelkan *long-range dependencies* dengan baik dan mencapai akurasi sekitar 82–83% pada kondisi pencahayaan lapangan yang tidak terkontrol, sebuah hasil yang kompetitif dan dalam beberapa kasus melampaui CNN konvensional pada dataset yang sama[13].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa efektivitas ViT dalam klasifikasi tingkat kematangan buah pisang telah terbukti, namun terbatas hanya pada satu jenis buah tunggal tanpa pengujian generalisasi terhadap buah tropis lainnya seperti mangga dan pepaya [14]. Dengan demikian, masih terbuka peluang penelitian signifikan untuk mengaplikasikan ViT pada klasifikasi multi-buah secara bersamaan dengan evaluasi mendalam terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi performa model seperti variasi pencahayaan lapangan, sudut pengambilan gambar, dan kondisi latar belakang . Selain itu, implementasi ViT dalam sistem pengendalian kualitas otomatis pada tahap pascapanen melalui aplikasi *mobile* yang dapat diakses langsung di lapangan masih belum banyak dieksplorasi, padahal sangat penting untuk meningkatkan adoptabilitas teknologi di kalangan praktisi industri pertanian . Penelitian ini akan menjadi kontribusi signifikan dalam mengisi *gap* penelitian tersebut dengan mengembangkan sistem klasifikasi berbasis ViT yang praktis dan dapat diterapkan secara langsung di lapangan untuk mendukung transformasi digital pengendalian kualitas buah pascapanen.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan mempertimbangkan latar belakang yang telah di uraikan, penulis ingin mengetahui hal hal berikut:

1. Bagaimana menerapkan arsitektur *Vision Transformer* (ViT) dalam proses klasifikasi tingkat kematangan buah pisang, mangga, dan pepaya berdasarkan citra digital?
2. Apa saja faktor yang mempengaruhi performa model *Vision Transformer* dalam mengenali tingkat kematangan buah ?
3. Bagaimana penerapan model *Vision Transformer* dapat mendukung sistem pengendalian kualitas buah pascapanen secara otomatis, efisien, dan konsisten?

1.3 Batasan Penelitian

Untuk memfokuskan penelitian ini, penulis akan menetapkan batasan masalah sehingga analisis yang dikembangkan memiliki tujuan yang spesifik.

1. Penelitian ini difokuskan pada tiga jenis buah tropis, yaitu pisang, mangga, dan pepaya sebagai objek klasifikasi tingkat kematangan.
2. Dataset yang digunakan berasal dari satu sumber, yaitu dataset dari hasil pengambilan gambar secara mandiri menggunakan kamera smartphone resolusi 12 megapiksel dengan pencahayaan alami dalam format rasio aspek 3:4 (portrait orientation) dengan total dataset terdiri dari 1000-1200 gambar.
3. Citra buah yang digunakan dibatasi pada tampak luar (*eksterior*) buah dengan latar belakang sederhana, tanpa mempertimbangkan kondisi bagian dalam buah.
4. Penelitian hanya berfokus pada klasifikasi tingkat kematangan buah, tidak mencakup deteksi penyakit, ukuran, ataupun cacat fisik pada buah.
5. Implementasi sistem dalam penelitian ini berupa aplikasi mobile berbasis Android.
6. Penelitian ini dilakukan terbatas pada area kota Lhokseumawe.
7. Fokus utama pengujian diarahkan pada evaluasi kinerja model melalui metrik klasifikasi komprehensif yang mencakup *confusion matrix*, *accuracy/precision/recall/F1-score* per kelas, *robustness testing* pada variasi pencahayaan dan sudut, dan *inference latency*, bukan pada aspek rekayasa perangkat lunak maupun pengujian penerimaan pengguna secara mendalam.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disediakan, tujuan penelitian dapat diformulasikan sebagai berikut:

1. Menerapkan arsitektur *Vision Transformer* (ViT) dalam proses klasifikasi tingkat kematangan buah tropis (pisang, mangga, dan pepaya) berdasarkan citra digital, guna mengidentifikasi tahap kematangan secara otomatis.
2. Mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi performa model *Vision Transformer* dalam mengenali tingkat kematangan buah, seperti variasi pencahayaan, sudut pengambilan gambar, kualitas resolusi citra, dan pengaturan *hyperparameter* pelatihan.

3. Mengimplementasikan sistem berbasis *mobile* yang mampu melakukan prediksi tingkat kematangan buah secara otomatis, efisien, dan konsisten.

1.5 Manfaat Penelitian

Penerapan *Vision Transformer* pada Klasifikasi Kematangan dan Pengendalian Kualitas Otomatis pada Buah Pascapanen memberikan manfaat yang signifikan dari berbagai aspek sebagai berikut :

1. Manfaat teoritis

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi berkelanjutan terhadap kemajuan pengembangan ilmu pengetahuan di bidang *computer vision* dan *deep learning*, khususnya terkait penerapan praktis arsitektur *Vision Transformer* (ViT) untuk klasifikasi tingkat kematangan buah-buahan tropis secara otomatis. Temuan dan hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi akademis bagi para penelitian lainnya yang ingin melakukan perbandingan mendalam antara performa ViT dengan arsitektur lain seperti CNN klasik atau model *Transformer* varian terbaru dalam kasus spesifik klasifikasi tingkat kematangan dan evaluasi kualitas buah pada tahap pascapanen. Kontribusi teoritis ini juga memperkaya literatur ilmiah tentang efektivitas model *Transformer* dalam domain visi komputer khususnya untuk aplikasi pertanian modern.

2. Manfaat metodologis

Penelitian ini menyajikan alur pengembangan sistem yang komprehensif dan terstruktur dengan baik, mencakup tahapan pengambilan dan akuisisi citra buah menggunakan perangkat kamera *smartphone* standar, tahapan pra-pemrosesan data (*pre-processing*) dan augmentasi citra yang variatif, tahapan perancangan arsitektur *Vision Transformer* yang spesifik, hingga tahapan evaluasi performa model dengan menggunakan berbagai metrik klasifikasi yang berbeda-beda. Rangkaian tahapan metodologi sistematis tersebut diharapkan dapat menjadi panduan dan acuan praktis bagi penelitian sejenis lainnya yang mengkaji masalah klasifikasi tingkat kematangan buah atau klasifikasi objek pertanian lain yang berbasis analisis citra digital dan AI. Selain itu, analisis mendalam terhadap berbagai faktor-faktor penting yang mempengaruhi performa model seperti variasi pencahayaan lingkungan, variasi sudut pengambilan gambar, dan kualitas

resolusi citra memberikan gambaran metodologis yang lebih lengkap dan komprehensif untuk pengembangan model serupa atau lebih baik di masa depan.

3. Manfaat praktis

Aplikasi *mobile* berbasis Android yang dikembangkan dalam penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan secara praktis sebagai alat bantu yang handal untuk mengklasifikasi tingkat kematangan buah pisang, mangga, dan pepaya secara otomatis dengan hasil yang lebih konsisten dan akurat dibandingkan dengan penilaian manual tradisional yang subjektif. Sistem klasifikasi otomatis ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan proses sortasi dan pengendalian kualitas buah pada tahap pascapanen, karena mampu mempercepat kecepatan proses penilaian tingkat kematangan secara signifikan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manusia yang menilai secara visual dan subjektif. Dengan demikian, penelitian dan implementasi sistem ini dapat mendukung pengembangan lebih lanjut teknologi pertanian cerdas dan presisi (*smart agriculture*) yang mengintegrasikan teknologi kecerdasan buatan secara mendalam dalam rantai pasok buah modern.

4. Manfaat bagi penjual buah atau pelaku usaha

Bagi kalangan penjual buah profesional, pedagang buah grosir, dan berbagai pelaku usaha yang bergerak di bidang penanganan pascapanen buah, sistem klasifikasi tingkat kematangan berbasis aplikasi *mobile* ini diharapkan dapat membantu mereka secara efektif dalam memastikan bahwa buah yang dijual kepada konsumen atau didistribusikan ke pasar berada pada tingkat kematangan yang tepat dan sesuai dengan kebutuhan pasar target yang spesifik. Penggunaan dan penerapan sistem klasifikasi otomatis ini memiliki potensi signifikan untuk mengurangi risiko kerugian finansial akibat buah yang terlalu mentah atau terlalu matang saat didistribusikan, sehingga dapat meningkatkan tingkat kepuasan pelanggan secara keseluruhan dan membantu menjaga reputasi kualitas produk buah di mata konsumen. Selain itu, kemudahan operasional dalam penggunaan aplikasi pada perangkat *smartphone* yang murah dan terjangkau memungkinkan pelaku usaha kecil maupun menengah (UMKM) untuk memanfaatkan dan mengakses sehingga dapat meningkatkan daya saing bisnis mereka di pasar.