BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perangkat elektronik pada dasarnya tersusun dari berbagai komponen seperti resistor, kapasitor, transistor, dan IC yang saling terhubung untuk menjalankan fungsi tertentu[1]. Pada masa awal, koneksi antar komponen dibuat menggunakan kabel (*wiring point-to-point*), namun metode tersebut tidak efisien karena memakan ruang, sulit dirawat, dan rentan terhadap gangguan serta korosi [2]. Dengan berkembangnya teknologi, diperkenalkan *Printed Circuit Board* (PCB) yang memungkinkan penyusunan dan penghubungan komponen secara rapi melalui jalur konduktor yang terintegrasi dalam satu papan [3]. PCB dapat dianggap sebagai "tulang dan jaringan saraf" perangkat elektronik[4], karena selain menjadi penopang fisik komponen, PCB juga berfungsi sebagai media distribusi sinyal listrik yang presisi dan stabil[5]. Memahami struktur dan cara kerja PCB, termasuk kemampuan mengklasifikasi cacat atau anomali seperti *open circuit*, *spur*, atau *short*, sangat penting dalam proses pemeliharaan dan perbaikan perangkat elektronik[6], [7]. Klasifikasi dini terhadap jenis kerusakan PCB tidak hanya mempercepat *troubleshooting*, tetapi juga mengurangi biaya dan mencegah kerusakan lanjutan pada sistem.

Pentingnya pengembangan metode deteksi dan klasifikasi kerusakan PCB juga didukung oleh kondisi nyata pada industri manufaktur elektronik. Penelitian oleh Tanto Wijaya menunjukkan bahwa proses inspeksi cacat PCB memiliki peran penting dalam menjaga kualitas produk, mengurangi biaya pengerjaan ulang (*rework*), serta mencegah gangguan layanan yang dapat menurunkan kepercayaan pelanggan terhadap konsistensi kualitas produksi. Berdasarkan data produksi pada proses *rework soldering*, tingkat penolakan (*reject rate*) PCB sebelum dilakukan perbaikan proses mencapai rata-rata 6,46%, dengan nilai tertinggi sebesar 7,89%, yaitu 1.680 papan cacat dari total 26.000 papan yang diproduksi. Analisis Pareto pada penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa lebih dari 80% kegagalan

produksi disebabkan oleh dua jenis cacat dominan, yaitu *bridging* dan *tombstoning*. Setelah dilakukan perbaikan proses menggunakan metode *Process Failure Mode and Effects Analysis* (PFMEA), rata-rata *reject rate* berhasil diturunkan menjadi 2,52%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberadaan sistem deteksi cacat yang akurat berperan penting dalam meningkatkan kualitas produksi sekaligus menekan biaya akibat produk cacat[8].

Pada umumnya, identifikasi dan klasifikasi kerusakan pada *Printed Circuit Board* (PCB) dilakukan melalui proses inspeksi oleh teknisi yang memiliki pengetahuan mengenai karakteristik fisik dan fungsi jalur konduktor pada PCB [9]. Dalam proses tersebut, teknisi tidak hanya menentukan jenis kerusakan yang terjadi, tetapi juga melakukan analisis terhadap karakteristik struktur kerusakan, seperti jalur yang terputus pada *open circuit*, hubungan tidak semestinya pada *short circuit*, tonjolan konduktor pada *spur*, maupun hilangnya lubang pada *missing hole*. Proses ini membutuhkan pengalaman dan pemahaman yang baik mengenai desain serta karakteristik PCB sehingga hasil inspeksi dapat dipengaruhi oleh tingkat keahlian teknisi yang melakukan pemeriksaan [5], [10]. Selain memerlukan pengetahuan khusus, proses inspeksi manual juga cenderung memakan waktu karena ukuran jalur PCB yang relatif kecil, kompleksitas pola *routing*, serta banyaknya variasi jenis kerusakan yang harus diperiksa [9]. Pada lingkungan produksi dengan jumlah PCB yang besar, proses inspeksi manual menjadi kurang efisien dan sulit diskalakan karena membutuhkan sumber daya manusia yang lebih banyak serta biaya operasional yang lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode otomatis yang mampu membantu proses identifikasi dan klasifikasi kerusakan PCB secara lebih cepat dan konsisten.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah klasifikasi berbasis kecerdasan buatan, khususnya metode *deep learning* seperti *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *You Only Look Once* (YOLO), yang mampu mempelajari pola visual kerusakan secara otomatis dari data citra PCB. Meskipun demikian, hasil klasifikasi yang diberikan oleh model *deep learning* umumnya diperoleh berdasarkan pola visual yang dipelajari selama proses pelatihan, sehingga alasan di balik keputusan klasifikasi yang dihasilkan sering kali sulit untuk diinterpretasikan

secara langsung.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, hasil deteksi dapat divalidasi melalui analisis morfologi (*morphological analysis*) terhadap struktur kerusakan yang teridentifikasi. Analisis morfologi memungkinkan ekstraksi karakteristik geometris dan topologi dari objek, seperti keterhubungan jalur konduktor, percabangan jalur, maupun keberadaan struktur tertentu yang menjadi ciri khas suatu jenis kerusakan. Dengan demikian, proses klasifikasi tidak hanya bergantung pada kemiripan pola visual yang dipelajari oleh model *deep learning*, tetapi juga didukung oleh analisis karakteristik struktur kerusakan yang menyerupai proses penalaran yang dilakukan oleh teknisi saat melakukan inspeksi PCB.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan suatu pendekatan yang tidak hanya mampu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan kerusakan PCB secara otomatis, tetapi juga mampu memvalidasi hasil klasifikasi berdasarkan karakteristik struktur kerusakan yang terdeteksi. Integrasi metode deteksi objek berbasis YOLO dengan proses segmentasi citra serta analisis morfologi melalui representasi struktur jalur konduktor diharapkan dapat menghasilkan sistem yang tidak hanya memiliki kemampuan klasifikasi yang baik, tetapi juga mampu memberikan dasar analisis yang lebih sesuai dengan proses inspeksi yang dilakukan oleh teknisi. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan diharapkan dapat meningkatkan efisiensi proses inspeksi PCB sekaligus memberikan hasil klasifikasi yang lebih dapat dipertanggungjawabkan.

1.2 Rumusan Masalah

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan kemampuan model *deep learning* dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan kerusakan PCB, tetapi masih ditemukan tantangan dalam membedakan jenis kerusakan yang memiliki karakteristik visual yang mirip maupun pada kondisi citra yang bervariasi. Selain permasalahan visual, sebagian besar penelitian sebelumnya belum memanfaatkan karakteristik morfologi berupa bentuk, konektivitas, dan struktur geometris jalur PCB sebagai dasar untuk memverifikasi kesesuaian hasil klasifikasi yang dihasilkan model *deep learning*. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang tidak

hanya mampu melakukan klasifikasi kerusakan PCB secara otomatis, tetapi juga dapat memvalidasi hasil klasifikasi berdasarkan karakteristik struktur kerusakan yang terdeteksi. Penelitian ini mengusulkan penggunaan YOLO sebagai metode deteksi dan klasifikasi awal yang kemudian didukung oleh segmentasi, *skeletonize*, dan analisis morfologi untuk mengevaluasi kesesuaian karakteristik struktur kerusakan dengan kelas yang diprediksi. Dengan pendekatan tersebut, diharapkan sistem mampu menghasilkan proses klasifikasi yang lebih konsisten serta didukung oleh analisis karakteristik struktur kerusakan yang lebih mudah diinterpretasikan.

1.3 Batasan Penelitian

Klasifikasi PCB akan dilakukan menggunakan model YOLOv11 dan di verifikasi menggunakan analisis morfologi, dengan batasan sebagai berikut:

1. Jenis kerusakan hanya berfokus pada kerusakan jalur PCB yang dapat dilihat secara visual, yaitu *open circuit*, *short*, *spurious copper, spur, missing hole, dan mouse bite* .
2. Data yang digunakan adalah *circuit board* yang di ambil dari gabungan dataset yang bersumber dari penelitian Online PCB Defect Detector On A New PCB Defect Dataset [11] dan dataset terbuka PCB dari Peking University [12].
3. Gambar yang di ambil untuk *scanning* dan *training* YOLO memiliki resolusi minimal 400x400 pixel.
4. Lingkup komponen *circuit board* adalah bagian jalur dari PCB.
5. Proses deteksi dan klasifikasi awal kerusakan PCB dilakukan menggunakan model YOLOv11.
6. Karakteristik kerusakan yang digunakan terbatas pada bentuk dan struktur geometris yang dapat direpresentasikan dalam citra.
7. Penelitian hanya mengevaluasi kerusakan yang berada pada area hasil deteksi (*Region of Interest*/ROI) yang dihasilkan oleh model YOLO.
8. Analisis morfologi dilakukan berdasarkan aturan (*rule-based*) yang dirancang untuk setiap jenis kerusakan dan tidak mencakup seluruh kemungkinan variasi bentuk kerusakan PCB.

1.4 Pertanyaan Penelitian

1. Bagaimana merancang dan melatih model untuk mengklasifikasikan kerusakan PCB melalui foto menggunakan YOLO?
2. Bagaimana mengevaluasi performa dari model yang dihasilkan menggunakan YOLO?
3. Bagaimana merancang algoritma untuk melakukan validasi jenis kerusakan PCB melalui hasil klasifikasi YOLO?
4. Bagaimana mengimplementasikan model klasifikasi dan validasi yang dihasilkan ke dalam aplikasi sederhana ?

1.5 Tujuan Penelitian

1. Merancang dan melatih model untuk mengklasifikasikan kerusakan PCB melalui foto menggunakan YOLO
2. Melakukan evaluasi performa dari model yang dihasilkan YOLO.
3. Menggunakan teknik masking, skeletonization, serta rule-based analysis sebagai rancangan algoritma untuk melakukan validasi jenis kerusakan PCB melalui hasil klasifikasi YOLO.
4. Menggunakan *framework streamlit* sebagai implementasi model yang dihasilkan ke dalam aplikasi, yang diujikan oleh ahli.

1.6 Manfaat Penelitian

1) Manfaat Teoretis

   Menambah referensi dan kajian ilmiah mengenai penerapan *model machine learning* untuk klasifikasi kerusakan fisik PCB, sekaligus menjadi contoh implementasi integrasi AI ke dalam sistem penerapan citra digital.

2) Manfaat Praktis

   Mempermudah klasifikasi kerusakan fisik PCB melalui penggunaan *machine learning*, sehingga dapat digunakan sebagai alat bantu klasifikasi kerusakan.