

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api merupakan moda transportasi yang efisien, ramah lingkungan, dan memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas penumpang serta distribusi barang secara massal di Indonesia. Kontribusi sektor transportasi rel terhadap total moda transportasi di Indonesia masih rendah (0,84%), tetapi pengembangan infrastruktur rel menunjukkan pertumbuhan yang signifikan dan berperan dalam peningkatan efisiensi logistik nasional (Dwiatmoko dkk., 2020). Keandalan dan keselamatan operasional kereta api sangat bergantung pada kondisi rel yang optimal. Rel kereta api yang digunakan secara intensif dan berulang akan mengalami kerusakan pada permukaan rel, yang dapat menyebabkan rel tidak dapat berfungsi dengan baik (Arifianto, 2023). Cacat pada rel menimbulkan risiko keselamatan yang serius, menyebabkan kecelakaan kereta api yang membahayakan keselamatan penumpang dan kru, merusak peralatan, serta mengganggu layanan transportasi (Kumar dkk., 2024). Sehingga deteksi dini terhadap cacat menjadi krusial dalam menjaga keselamatan dan efisiensi transportasi kereta api (Zhao dkk., 2022).

Deteksi dan inspeksi cacat pada rel kereta api merupakan aspek krusial dalam menjamin keselamatan dan efisiensi operasional. Namun, proses ini menghadapi berbagai tantangan teknis dan operasional yang signifikan. Metode inspeksi tradisional, seperti pemeriksaan visual manual, sering kali memerlukan waktu yang lama, bergantung pada pengalaman inspeksi, dan rentan terhadap kesalahan

manusia, sehingga efisiensinya rendah dan kurang dapat diandalkan (Xiong dkk., 2023). Selain itu, metode ini memerlukan waktu dan tenaga yang signifikan, serta dapat mengganggu operasi kereta api karena kebutuhan untuk menghentikan layanan selama inspeksi (Kumar dkk., 2024). Untuk mengatasi keterbatasan ini, berbagai teknologi pengujian non-destruktif (NDT) yaitu pengujian ultrasonik (UT), pengujian elektromagnetik (ET), dan pengujian visual (VT), telah digunakan untuk mendeteksi cacat pada rel. Inspeksi berbasis UT efektif untuk mendeteksi cacat internal tetapi kurang efektif untuk cacat permukaan (Xiong dkk., 2023). Inspeksi berbasis VT lebih cepat, efisien, dan sepenuhnya non-invasif dibandingkan teknik inspeksi lainnya, sehingga lebih cocok untuk mendeteksi cacat pada permukaan rel (Zhang dkk., 2023).

Berbagai pendekatan *deep learning* telah diimplementasikan untuk mendeteksi cacat pada rel kereta api berbasis visual dengan hasil yang bervariasi. Salah satu model, ECARRNet, yang merupakan gabungan dari *convolutional autoencoder*, ResNet, dan *recurrent neural network*, mampu mencapai akurasi 93,28% (Eunus dkk., 2024). Namun penelitian ini masih menghadapi tantangan dalam mendeteksi cacat yang jarang terjadi pada rel karena masalah ketidakseimbangan *dataset* yang diatasi dengan *oversampling*, dan fokusnya tetap pada klasifikasi biner (Eunus dkk., 2024). Penerapan YOLOv11 untuk deteksi cacat rel juga telah dilaporkan menghasilkan akurasi uji sebesar 92,64%, tetapi masih terbatas pada klasifikasi biner antara rel cacat dan tidak cacat (Rodríguez-Abreo dkk., 2025). Studi lain yang menerapkan *deep learning neural network* juga berfokus pada klasifikasi biner, dengan akurasi training sebesar 80,41% dan akurasi

testing sebesar 79%. (Arifianto, 2023) Beberapa studi juga menunjukkan bahwa meskipun model-model *deep learning* seperti EfficientNet mencapai akurasi 91% dalam 30 *epoch*, keterbatasan pada dataset yang kurang bervariasi tetap menjadi kendala dalam mendeteksi berbagai jenis cacat rel (Mordia dkk., 2022). Dengan demikian, mayoritas penelitian sebelumnya ini seringkali berfokus pada deteksi cacat biner (cacat atau tidak cacat).

YOLO (*You Only Look Once*) versi 11 merupakan evolusi terkini dari keluarga algoritma deteksi objek yang menawarkan keseimbangan optimal antara akurasi deteksi dan kecepatan inferensi, menjadikannya cocok untuk inspeksi rel kereta api dengan berbagai keunggulan teknis yang mengatasi keterbatasan model-model sebelumnya, YOLOv11 menghadirkan modul *Cross-Stage Partial with Self-Attention* (C2PSA) untuk menangkap informasi kontekstual secara lebih efektif, serta menggantikan blok C2f dengan C3k2 guna meningkatkan efisiensi dan kecepatan inferensi (Jegham dkk., 2024). Fitur-fitur ini membuat YOLOv11 unggul dalam mendeteksi objek kecil atau saling bertumpuk dengan presisi tinggi (L. He dkk., 2024). Keunggulan ini menjadikan YOLOv11 sebagai solusi yang handal untuk mendukung sistem inspeksi rel kereta api dengan efisiensi tinggi.

Penelitian terkait deteksi cacat rel telah menunjukkan perkembangan signifikan, sebagian besar masih terbatas pada klasifikasi biner (cacat atau tidak cacat) dan belum banyak mengeksplorasi YOLOv11 untuk deteksi multi-kelas. Deteksi multi- kelas memiliki keunggulan penting karena mampu membedakan jenis- jenis cacat spesifik yang masing-masing memerlukan tindakan perbaikan berbeda (Ji dkk., 2021), sehingga mendukung keputusan pemeliharaan yang lebih

tepat sasaran. Namun, implementasi deteksi multi-kelas menghadapi tantangan tersendiri, khususnya pada dataset dengan karakteristik yang kompleks seperti ketidakseimbangan kelas dan variasi ukuran objek yang signifikan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan YOLOv11 untuk deteksi multi-kelas cacat permukaan rel kereta api dan melakukan eksperimen sistematis untuk mengidentifikasi konfigurasi optimal dalam meningkatkan performa deteksi. Eksperimen mencakup pengaruh resolusi input terhadap kemampuan deteksi objek dengan berbagai ukuran, strategi augmentasi data untuk meningkatkan representasi visual yang beragam, serta evaluasi modifikasi arsitektur menggunakan *attention mechanism*. Pendekatan sistematis ini diharapkan tidak hanya menghasilkan model dengan performa tinggi, tetapi juga memberikan *insight* mengenai faktor-faktor yang paling berkontribusi terhadap akurasi deteksi pada konteks cacat permukaan rel. Model yang dihasilkan berpotensi mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual, mempercepat proses deteksi cacat, dan meningkatkan keselamatan operasional kereta api secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengimplementasikan dan kinerja model YOLOv11 dalam mendeteksi berbagai jenis cacat permukaan rel kereta api?
2. Bagaimana pengaruh resolusi input, augmentasi data, dan modifikasi arsitektur terhadap performa deteksi cacat permukaan rel kereta api?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja model YOLOv11 dalam mendeteksi cacat rel berdasarkan metrik evaluasi seperti *precision*, *recall*, dan mAP.
2. Menentukan konfigurasi optimal melalui studi ablasi terhadap resolusi input, strategi augmentasi data, dan modifikasi arsitektur untuk meningkatkan performa deteksi.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Menghasilkan model deteksi objek berbasis YOLOv11 untuk mendeteksi cacat pada rel kereta api, yang dapat mendukung sistem pemeliharaan infrastruktur rel secara otomatis dan efisien.
2. Menyediakan hasil evaluasi performa model YOLOv11 dalam mendeteksi cacat rel multi-kelas, yang dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup penelitian agar lebih terfokus, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Dataset yang digunakan adalah data citra cacat rel yang bersumber dari Roboflow yang telah dianotasi.

2. Cacat yang dideteksi terbatas pada lima kelas: empat jenis cacat permukaan rel (*breaks, cracks, lightband, scars*) serta lokalisasi struktur rel (*rails*)
3. Seluruh eksperimen dilakukan dalam lingkungan komputasi berbasis GPU NVIDIA Tesla T4 pada Google Colab dengan total 100 *epoch* untuk setiap konfigurasi.
4. Eksperimen penerapan *attention mechanism* hanya mengeksplorasi satu teknik yaitu EMA (*Efficient Multi-scale Attention*), teknik *attention mechanism* lainnya tidak dieksplorasi dalam penelitian ini.
5. Studi ablasi difokuskan pada tiga aspek utama: resolusi input (640 dan 1280 piksel), strategi augmentasi data, dan modifikasi arsitektur.