

Deteksi Pelanggaran Lalu Lintas di Jalan Tol Menggunakan Framework YOLO dan Kalman Filter

Fathan Qoriba Hanif^{1*}, Rudi Heriansyah², Zaid Romegar Mair³

¹⁻³Universitas Indo Global Mandiri, Palembang, Indonesia

Email: 2021110104@students.uigm.ac.id¹, rudi@uigm.ac.id², zaidromegar@uigm.ac.id³

Alamat: Jl. Jend. Sudirman Km.4 No. 62, 20 Ilir D. IV, Kec. Ilir Tim. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan, Indonesia

Korespondensi penulis: 2021110104@students.uigm.ac.id*

Abstract. Traffic violations, such as exceeding the speed limit and inappropriate lane usage, are among the main factors causing accidents and congestion on toll roads. To improve traffic safety and efficiency, an automated monitoring system capable of detecting and analyzing violations quickly and accurately is needed. This research aims to develop and evaluate a detection system for speed limit violations and lane misuse by heavy vehicles using deep learning-based object recognition and tracking technology. The method used is the YOLO (You Only Look Once) framework for object detection and the Kalman Filter to track vehicle movement between frames, thereby refining position and speed estimates. The research data was obtained from CCTV video recordings installed along the toll road. The developed system is capable of detecting vehicles, calculating speed based on the shift between frames, and analyzing vehicle position in relation to lane usage regulations. The model evaluation results demonstrated quite good performance with an accuracy of 83.97%, a precision of 0.702, a recall of 0.757, and an F1 score of 0.758. The combination of YOLO and the Kalman Filter proved effective in detecting and tracking vehicles in real time, with adequate accuracy and efficient processing speed. This study concludes that a deep learning-based system can be an innovative solution to support automated traffic monitoring on toll roads. Implementing such a system has the potential to help reduce traffic violations, prevent accidents, and improve driving safety. Furthermore, this study provides recommendations for further development for integration with intelligent transportation technology to support more adaptive and sustainable traffic management.

Keywords: Detection System, Kalman Filter, Smart Transportation, Traffic Violations, YOLO.

Abstrak. Pelanggaran lalu lintas, seperti melebihi batas kecepatan dan penggunaan lajur yang tidak sesuai, merupakan salah satu faktor utama penyebab kecelakaan serta kemacetan di jalan tol. Untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi lalu lintas, dibutuhkan sistem pemantauan otomatis yang mampu mendeteksi serta menganalisis pelanggaran secara cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan serta mengevaluasi sistem deteksi pelanggaran batas kecepatan dan kesalahan penggunaan lajur oleh kendaraan berat dengan memanfaatkan teknologi pengenalan dan pelacakan objek berbasis *deep learning*. Metode yang digunakan adalah kerangka kerja YOLO (*You Only Look Once*) untuk mendeteksi objek, serta Filter Kalman untuk melacak pergerakan kendaraan antar frame sehingga memperhalus estimasi posisi dan kecepatan. Data penelitian diperoleh dari rekaman video CCTV yang dipasang di sepanjang jalan tol. Sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi kendaraan, menghitung kecepatan berdasarkan perpindahan antar frame, serta menganalisis posisi kendaraan terkait aturan penggunaan lajur. Hasil evaluasi model menunjukkan performa yang cukup baik dengan akurasi sebesar 83,97%, presisi 0,702, *recall* 0,757, dan skor F1 0,758. Kombinasi YOLO dan Filter Kalman terbukti efektif dalam mendeteksi serta melacak kendaraan secara real time, dengan akurasi yang memadai dan kecepatan pemrosesan yang efisien. Studi ini menyimpulkan bahwa sistem berbasis *deep learning* dapat menjadi solusi inovatif untuk mendukung pemantauan lalu lintas otomatis di jalan tol. Implementasi sistem semacam ini berpotensi membantu mengurangi pelanggaran lalu lintas, mencegah kecelakaan, dan meningkatkan keselamatan berkendara. Selain itu, penelitian ini juga memberikan rekomendasi pengembangan lebih lanjut untuk integrasi dengan teknologi transportasi cerdas, guna mendukung terciptanya manajemen lalu lintas yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Kata kunci: Sistem Deteksi, Filter Kalman, Transportasi Cerdas, Pelanggaran Lalu Lintas, YOLO.

1. LATAR BELAKANG

Jalan tol sebagai infrastruktur transportasi modern dirancang untuk mengakomodasi lalu lintas berkecepatan tinggi secara aman dan efisien. Namun, pada kenyataannya, tingginya angka pelanggaran lalu lintas seperti pelampauan batas kecepatan dan penggunaan lajur yang tidak sesuai, khususnya oleh kendaraan berat, justru menjadikan jalan tol sebagai lokasi dengan risiko kecelakaan tinggi ((Putri, 2020); (Sudirman, 2014)). Pelanggaran ini tidak hanya mengganggu kelancaran lalu lintas, tetapi juga membahayakan keselamatan pengendara lain di jalur yang sama.

Upaya pengawasan konvensional oleh petugas di lapangan tidak lagi memadai untuk menjangkau kompleksitas sistem lalu lintas jalan tol yang padat dan luas. Keterbatasan jumlah personel, kecepatan kendaraan yang tinggi, serta keterbatasan jarak pandang menjadikan pendekatan manual tidak efisien dan rentan terhadap bias (Zhandy et al., 2023). Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) menjadi solusi krusial dalam pengembangan sistem pengawasan lalu lintas otomatis yang adaptif, cepat, dan akurat.

Salah satu algoritma AI berbasis visi komputer yang berkembang pesat adalah YOLO (*You Only Look Once*). YOLO dikenal sebagai metode deteksi objek satu tahap yang sangat cepat dan akurat, dengan pendekatan *grid-based* untuk menghasilkan *bounding box* dan *confidence score* dalam satu kali pemrosesan gambar ((Redmon et al., 2016); (Diwan et al., 2023)). Sejumlah studi menunjukkan keefektifan YOLO dalam mendeteksi objek kendaraan bahkan dalam kondisi lalu lintas padat ((Ahmed et al., 2024)).

Namun, deteksi objek saja tidak cukup jika tidak disertai dengan pelacakan yang konsisten antar *frame* untuk menghitung estimasi kecepatan dan posisi kendaraan. Dalam konteks ini, Kalman Filter menjadi metode penting karena mampu melakukan estimasi posisi objek yang bergerak secara rekursif dengan memperhitungkan *noise* dan dinamika sistem ((Rahmawati & Adi, 2017); (Wicaksono et al., 2020)). Kombinasi antara YOLO dan Kalman Filter diyakini dapat memperkuat sistem pengawasan lalu lintas secara signifikan.

Penguatan teoritis terhadap pendekatan ini juga didukung oleh hasil-hasil penelitian dari dosen-dosen Universitas Indo Global Mandiri (UIGM). (Mair & Rahmanda, 2025) mengembangkan komparasi performa YOLOv5, v8, dan v11 untuk mendeteksi elemen visual tulisan tangan Mair, yang membuktikan keunggulan YOLOv11 dalam akurasi dan efisiensi. (Saputra, 2024), dengan bimbingan Mair, menerapkan model SARIMA untuk memprediksi volume penumpang LRT di Palembang, yang menunjukkan integrasi AI dalam pengambilan kebijakan publik berbasis prediksi data.

Adapun karya Mair et al., seperti pengembangan permainan gestur “InGBas” menjadi bukti bahwa kolaborasi dosen-mahasiswa UIGM dalam pengembangan AI telah menjangkau aspek akademik hingga aplikasi praktis. Penelitian (Mair & Rahmanda, 2025) terkait perbandingan versi YOLO dalam mendeteksi spasi antar baris tulisan tangan, serta telaah sistematis (Mair, 2024) mengenai analisis pola tulisan tangan dengan Convolutional Neural Network dan hubungannya terhadap kepribadian (*Convolutional Neural Network Analysis on Handwriting Patterns and Its Relationship to Personality: A Systematical Review*), menjadi bukti bahwa kolaborasi dosen-mahasiswa UIGM dalam pengembangan AI telah menjangkau aspek akademik hingga aplikasi praktis.

Berlandaskan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: 1) Mendeteksi pelanggaran batas kecepatan kendaraan di Jalan Tol Kapal Betung KM362 menggunakan integrasi YOLO dan Kalman Filter. 2) Mendeteksi pelanggaran penggunaan lajur kanan oleh kendaraan truk berat secara otomatis dan *real-time*.

Penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan sistem pengawasan lalu lintas berbasis video yang adaptif, serta mendukung pengambilan kebijakan berbasis data di sektor transportasi nasional. Lebih jauh, sistem ini juga berpotensi menjadi rujukan bagi pengembangan *smart surveillance* berbasis AI untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan ketertiban lalu lintas.

2. KAJIAN TEORITIS

Pelanggaran Lalu Lintas di Jalan Tol

Pelanggaran lalu lintas merupakan setiap tindakan pengguna jalan yang bertentangan dengan peraturan perundang-undangan, dan pada konteks jalan tol, dua jenis pelanggaran yang paling sering terjadi adalah pelampauan batas kecepatan dan penyalahgunaan lajur oleh kendaraan berat. Karakteristik jalan tol yang memiliki jalur bebas hambatan dengan tingkat kenyamanan tinggi menjadi insentif psikologis bagi pengemudi untuk melampaui batas kecepatan yang ditetapkan ((Putri, 2020); (Sudirman, 2014)). Dalam UU No. 22 Tahun 2009 Pasal 108, diatur bahwa kendaraan berat wajib berada di lajur kiri, sementara lajur kanan hanya digunakan untuk mendahului atau dalam kondisi darurat.

Pelanggaran terhadap ketentuan tersebut tidak hanya menyebabkan hambatan lalu lintas tetapi juga meningkatkan risiko tabrakan beruntun akibat perbedaan kecepatan ekstrem antar kendaraan. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pemantauan yang mampu mendeteksi jenis pelanggaran tersebut secara otomatis dan berbasis data waktu nyata (Zhandy et al., 2023).

YOLO (*You Only Look Once*)

YOLO merupakan pendekatan *single-shot detection* yang mendeteksi objek dalam satu proses inferensi tanpa memisahkan tahap proposal *region* dan klasifikasi, sebagaimana pendekatan konvensional seperti R-CNN. YOLO membagi citra menjadi grid dan secara simultan memprediksi *bounding box* dan *confidence score* untuk masing-masing kelas objek dalam satu kali proses (Redmon et al., 2016). Efisiensinya menjadikan algoritma ini cocok untuk penerapan pada sistem pengawasan lalu lintas berbasis video *real-time* (Diwan et al., 2023).

Menurut (Mair & Rahmanda, 2025), YOLOv11 memperkenalkan optimalisasi arsitektur pada bagian *backbone*, *neck*, dan *head* untuk meningkatkan ketelitian deteksi multi-skala. Uji coba internal mereka menunjukkan bahwa YOLOv11 lebih unggul dibandingkan versi sebelumnya dalam mendeteksi tulisan tangan mahasiswa UIGM, terutama dalam hal stabilitas dan kecepatan inferensi. Dalam konteks analisis tulisan tangan, (Mair & Rahmanda, 2025) menegaskan bahwa arsitektur CNN, termasuk yang diintegrasikan dengan YOLO, dapat mengungkap pola visual yang berkorelasi dengan atribut psikologis individu. Pendekatan ini memperluas cakupan aplikasi YOLO dari sekadar deteksi objek fisik menuju pengenalan pola perilaku berbasis citra. Penelitian lain oleh (Heriansyah et al., 2024) mengenai *Deteksi Penyakit Diabetes Retinopathy Menggunakan Citra Digital dengan Metode Convolutional Neural Network (CNN)* membuktikan bahwa CNN memiliki kemampuan yang tinggi dalam mengenali pola visual kompleks pada citra medis, yang relevan dengan pengolahan citra lalu lintas karena keduanya memerlukan ekstraksi fitur yang presisi dari gambar resolusi tinggi.

Dengan kemampuan deteksi simultan dan struktur ringan, YOLO telah digunakan dalam berbagai konteks: dari pengawasan lalu lintas, pengenalan wajah, hingga sistem keamanan kota pintar (Ahmed et al., 2024). Dalam konteks jalan tol, YOLO dapat mendeteksi kendaraan secara tepat meskipun dalam kondisi padat atau pencahayaan yang minim. Penelitian (Febrian et al., 2025) menunjukkan bahwa penerapan YOLO pada deteksi pelanggaran pengendara sepeda motor, seperti tidak memakai helm atau melanggar marka, mampu memberikan akurasi tinggi pada kondisi lalu lintas padat. Hasil ini menguatkan relevansi algoritma YOLO tidak hanya untuk kendaraan roda empat di jalan tol, tetapi juga untuk moda transportasi roda dua dalam berbagai konteks lalu lintas.

Kalman Filter

Kalman Filter merupakan algoritma estimasi linier rekursif yang digunakan untuk memprediksi dan mengoreksi posisi suatu objek secara dinamis, berdasarkan sistem gerak dan hasil pengukuran aktual (Rahmawati & Adi, 2017). Prinsip kerja Kalman Filter terletak pada

dua tahap: prediksi posisi selanjutnya dan koreksi berdasarkan pengukuran aktual, yang menjadikan metode ini unggul dalam pelacakan objek yang bergerak cepat seperti kendaraan (Wicaksono et al., 2020).

Dalam sistem deteksi pelanggaran, Kalman Filter dapat digunakan untuk melacak pergerakan kendaraan dari *frame* ke *frame* sehingga memungkinkan perhitungan kecepatan berdasarkan waktu tempuh antar titik yang telah ditentukan. Kalman Filter juga membantu mengurangi kesalahan prediksi akibat *noise* dari kamera, perubahan pencahayaan, atau pergerakan kamera yang tidak stabil.

Penerapan Kalman Filter tidak hanya relevan dalam pelacakan kendaraan, tetapi juga telah digunakan dalam bidang robotika. Penelitian oleh (Pasemah, 2021) tentang *Balancing Robot dengan Sistem Kendali Proporsional Integral Derivatif (PID) dan Kalman Filter* menunjukkan bahwa metode ini efektif untuk menstabilkan sistem dinamis yang rentan terhadap gangguan, dengan prinsip yang serupa dalam pelacakan posisi kendaraan di jalan tol.

Kombinasi antara YOLO dan Kalman Filter telah banyak digunakan dalam sistem pelacakan multi-objek secara otomatis, termasuk dalam proyek internal UIGM seperti sistem pelacakan kendaraan dalam video LRT yang dikembangkan oleh (Saputra, 2024). Kombinasi ini terbukti mampu meningkatkan akurasi serta kestabilan pelacakan objek dalam jangka waktu panjang dan pada kondisi visual yang menantang.

CCTV dan Rekaman Video Sebagai Sumber Data

Sumber utama data dalam sistem deteksi pelanggaran adalah rekaman CCTV yang dipasang di sepanjang jalur jalan tol. Menurut (Sri Bintan, 2025), CCTV telah terbukti efektif untuk mendeteksi kondisi lalu lintas dan memberikan data visual akurat secara waktu nyata. Keberadaan kamera pengawas dengan resolusi tinggi serta teknologi *frame interpolation* memungkinkan sistem mendeteksi detail kendaraan seperti jenis, arah, serta posisi relatif terhadap marka jalan.

Dalam konteks penelitian ini, CCTV diposisikan sebagai input mentah untuk deteksi dan pelacakan objek kendaraan. Setelah diolah melalui algoritma YOLO dan Kalman Filter, informasi-informasi penting seperti kecepatan kendaraan dan posisi lajur dapat dianalisis untuk menentukan pelanggaran.

Artificial Intelligence dan Penerapannya di UIGM

Penggunaan AI dalam konteks penelitian dan pendidikan di lingkungan Universitas Indo Global Mandiri telah menjadi fokus dalam beberapa tahun terakhir. Penelitian oleh (Mair & Irfani, 2023) dalam proyek permainan gestur “InGBas” yang menggunakan CNN menunjukkan bahwa kemampuan implementasi AI di lingkungan akademik telah menjangkau

praktik eksperimental dengan hasil yang menjanjikan. Kolaborasi antara dosen dan mahasiswa ini menciptakan ekosistem inovatif yang menjadi fondasi penting dalam pengembangan teknologi berbasis AI di Sumatera Selatan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan orientasi terapan (*applied experiment*), yang berfokus pada pengembangan dan pengujian sistem deteksi pelanggaran lalu lintas berbasis teknologi pengolahan citra digital dan kecerdasan buatan. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi pelanggaran batas kecepatan serta pelanggaran penggunaan lajur oleh kendaraan berat di Jalan Tol Kapal Betung KM 362, dengan mengintegrasikan dua komponen utama: algoritma deteksi objek YOLO (*You Only Look Once*) dan metode pelacakan Kalman Filter.

Data yang digunakan berupa rekaman CCTV di jalan tol juga digunakan sebagai input utama dalam pengujian sistem deteksi dan pelacakan. Rekaman CCTV ini mencerminkan kondisi lalu lintas nyata dan menjadi dasar untuk menguji akurasi serta keandalan sistem dalam mendeteksi pelanggaran kecepatan dan posisi kendaraan di jalur yang tidak sesuai. Penggunaan data video ini penting untuk mensimulasikan kondisi sebenarnya di lapangan, sehingga hasil deteksi dapat lebih representatif terhadap situasi nyata.

Langkah pertama dalam pengolahan data dimulai dengan proses pra-pemrosesan (*pre-processing*) menggunakan pustaka OpenCV. Pada tahap ini, dilakukan konversi warna, normalisasi resolusi, serta segmentasi area yang menjadi fokus pengawasan (*region of interest*). Setelah itu, setiap frame dianalisis menggunakan algoritma YOLOv11, yang diimplementasikan melalui *framework PyTorch*. Model deteksi dilatih dan disesuaikan dengan karakteristik kendaraan di jalan tol Indonesia melalui *fine-tuning* pada dataset COCO serta tambahan dataset lokal dari hasil dokumentasi manual di lokasi penelitian.

Hasil dari proses deteksi objek berupa *bounding box* dan *confidence score* untuk setiap kendaraan. Informasi ini menjadi dasar bagi tahap berikutnya, yaitu pelacakan objek kendaraan menggunakan Kalman Filter. Metode ini digunakan untuk memperkirakan posisi objek secara dinamis antar *frame* video dengan meminimalisir gangguan *noise* dan memperhitungkan kecepatan gerak kendaraan. Estimasi posisi dan kecepatan kendaraan yang diperoleh dari Kalman Filter kemudian dikalibrasi terhadap skala visual pada video untuk menghasilkan nilai kecepatan dalam satuan kilometer per jam. Jika kecepatan melebihi ambang batas yang ditetapkan peraturan, maka sistem secara otomatis menandai kendaraan tersebut sebagai pelanggar.

Selain itu, sistem juga dibekali kemampuan untuk mengidentifikasi jenis kendaraan berdasarkan proporsi *bounding box* dan fitur visual lain yang dikenali oleh YOLO. Proses ini memungkinkan sistem mendeteksi pelanggaran penggunaan lajur kanan oleh kendaraan berat seperti truk atau bus, yang menurut regulasi lalu lintas wajib menggunakan lajur kiri kecuali saat menyalip.

Pengujian model deteksi dengan menggunakan data video sebagai input. Pengujian dilakukan dengan menggunakan model YOLO yang dikombinasikan dengan Kalman Filter. Dari pengujian tersebut, sistem akan mendeteksi dan menghitung jumlah kendaraan seperti mobil yang melakukan pelanggaran, baik dalam bentuk melebihi batas kecepatan di jalan tol (dengan ketentuan kecepatan minimum 60 km/jam dan maksimum 100 km/jam) maupun berkendara di lajur yang tidak sesuai.

Perbedaan utama antara penggunaan YOLO saja dan gabungan YOLO dengan Kalman Filter terletak pada kemampuan pelacakan objek. Tanpa Kalman Filter, objek hanya terdeteksi pada setiap frame secara individual tanpa mengetahui identitas atau jejak pergerakannya, sehingga jika objek tertutup sebagian atau blur, deteksinya bisa hilang. Sebaliknya, dengan Kalman Filter, objek dapat dilacak antar frame secara konsisten.

Analisis terhadap hasil evaluasi pengujian sistem deteksi yang telah dilatih. Analisis difokuskan pada metrik evaluasi seperti akurasi, presisi, recall, dan mAP yang dihasilkan oleh model. Hasil tersebut digunakan untuk menilai kinerja sistem deteksi dalam mengenali objek secara tepat dan konsisten. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana model mampu mendeteksi objek sesuai dengan data sebenarnya, serta mengidentifikasi kelebihan dan kekurangannya berdasarkan performa yang diperoleh.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Hasil Pengujian Menggunakan YOLO

Berdasarkan hasil pengujian model deteksi objek menggunakan YOLO pada *epoch* ke-100, diperoleh performa yang cukup optimal dalam mendeteksi kendaraan pada data uji. Evaluasi dilakukan terhadap dua kelas utama, yaitu *Car* dan *Truck*, serta keseluruhan, dengan mengacu pada metrik-metrik seperti *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, serta mAP@50 dan mAP@50–95.

Untuk kelas *Car*, yang terdiri atas 436 *instance* dari 51 gambar, model berhasil mencapai *precision* sebesar 0.763 dan *recall* sebesar 0.803, menghasilkan *F1-score* sebesar 0.783. Hal ini menunjukkan bahwa model mampu mendeteksi mobil dengan cukup akurat dan konsisten. Nilai mAP@50 sebesar 0.801 dan mAP@50–95 sebesar 0.457 menunjukkan

kemampuan model dalam memprediksi lokasi *bounding box* kendaraan dengan presisi tinggi dalam berbagai skala.

Sementara itu, untuk kelas *Truck*, dari 113 *instance* yang berasal dari 40 gambar, model mencatat *precision* sebesar 0.641 dan *recall* sebesar 0.711, menghasilkan *F1-score* sebesar 0.675. Meskipun nilai *F1-score* sedikit lebih rendah dibandingkan kelas *Car*, model tetap menunjukkan performa yang layak dalam mendeteksi truk, walaupun ada ruang untuk peningkatan terutama dari sisi presisi. Nilai *mAP@50* sebesar 0.715 dan *mAP@50–95* sebesar 0.373 juga mendukung kesimpulan bahwa model mampu mengenali truk dalam berbagai kondisi, namun dengan akurasi spasial yang sedikit lebih rendah.

Secara keseluruhan, dari 60 gambar dengan total 549 *instance*, model mencatat *accuracy* sebesar 83,97%, *precision* sebesar 0.702, *recall* sebesar 0.757, dan *F1-score* sebesar 0.758. Dengan *mAP@50* sebesar 0.758 dan *mAP@50–95* sebesar 0.415, dapat disimpulkan bahwa model memiliki performa yang cukup baik dalam melakukan deteksi objek kendaraan secara umum, dengan keseimbangan antara ketepatan klasifikasi dan akurasi lokasi objek.

Berdasarkan hasil tersebut, model YOLO pada *epoch* ke-100 dinilai cukup andal untuk digunakan dalam sistem deteksi pelanggaran lalu lintas berbasis video.

Pengujian Menggunakan YOLO dan Kalman Filter

Pengujian pada tahap ini dilakukan dengan menggabungkan metode YOLO sebagai pendeteksi objek dan Kalman Filter sebagai pelacak objek *antar-frame*, untuk menghasilkan identifikasi kendaraan yang konsisten dan akurat. Berdasarkan hasil uji, sistem mampu mengklasifikasikan kendaraan ke dalam tiga kategori kecepatan, yaitu *overspeed*, normal, dan *low speed*.

Klasifikasi ini dilakukan dengan membandingkan jarak tempuh objek pada sejumlah *frame* terhadap waktu tempuhnya, yang dihitung berdasarkan *frame rate* video. Kategori *overspeed* menunjukkan kendaraan yang melebihi batas kecepatan yang ditentukan, normal menunjukkan kendaraan yang berada dalam rentang kecepatan aman, sedangkan *low speed* menunjukkan kendaraan yang bergerak sangat lambat atau hampir berhenti. Kemampuan sistem untuk membedakan kategori ini menunjukkan bahwa integrasi antara YOLO dan *Kalman Filter* efektif dalam mendeteksi serta melacak kendaraan secara akurat.

Lebih lanjut, pengujian juga dilakukan menggunakan video dengan empat variasi *frame rate*, yaitu 30 FPS, 60 FPS, 90 FPS, dan 120 FPS untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap akurasi pelacakan. Hasil pengujian ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Menggunakan Variasi FPS

FPS	Jumlah Kendaraan	Kendaraan Terdeteksi	Low Speed	Normal	Overspeed
30	17	17	17	-	-
60	17	17	12	5	-
90	17	17	7	7	3
120	17	17	6	5	6

Berdasarkan Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kecepatan kendaraan secara lebih variatif pada FPS yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena peningkatan jumlah *frame* per detik memungkinkan sistem untuk menangkap pergerakan kendaraan secara lebih rinci dan presisi, sehingga perhitungan kecepatan antar-*frame* menjadi lebih akurat. Pengujian menggunakan video 120 FPS bertujuan untuk menguji batas maksimum sistem dalam melacak kendaraan cepat. Meskipun tidak umum digunakan pada CCTV jalan tol, pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap input berfrekuensi tinggi.

Temuan ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu mengenali kendaraan secara *real-time*, tetapi juga memiliki fleksibilitas untuk digunakan dalam berbagai kondisi rekaman CCTV di lapangan. Dengan penyesuaian nilai FPS yang sesuai, sistem tetap dapat menghitung kecepatan secara akurat. Namun demikian, pada FPS rendah (30 FPS), meskipun semua kendaraan berhasil terdeteksi, sistem belum dapat membedakan kategori kecepatan secara mendetail karena keterbatasan jumlah *frame* antar garis *RoI*.

Berdasarkan pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa sistem bekerja lebih optimal pada FPS tinggi. Hasil ini menjadi dasar untuk pengujian lebih lanjut terkait pelanggaran lalu lintas yang tidak hanya berdasarkan kecepatan, tetapi juga posisi kendaraan terhadap lajur yang seharusnya.

Pengujian Deteksi Pelanggaran Lajur oleh Truk

Selain pengujian kecepatan kendaraan, sistem juga diuji untuk mendeteksi pelanggaran lajur oleh kendaraan berat, khususnya truk yang berada di lajur kanan. Dalam peraturan lalu lintas jalan tol di Indonesia, kendaraan berat seperti truk dilarang menggunakan lajur kanan karena lajur tersebut diperuntukkan bagi kendaraan yang ingin menyalip dengan kecepatan lebih tinggi. Oleh karena itu, pelanggaran ini menjadi fokus tambahan dalam pengujian sistem deteksi.

Deteksi pelanggaran lajur dilakukan dengan menganalisis posisi koordinat *bounding box* kendaraan terhadap area lajur kanan pada citra video. Lajur kanan didefinisikan sebagai area pada sisi kanan *frame* berdasarkan pembagian proporsional dari lebar jalan. Jika *bounding box* dari kendaraan yang terklasifikasi sebagai truk berada pada zona lajur kanan selama beberapa *frame* berturut-turut, maka sistem akan menandainya sebagai pelanggaran.

Untuk analisis lebih lanjut, sistem tidak hanya mengidentifikasi truk yang melanggar lajur, tetapi juga mencatat jumlah total truk yang terdeteksi selama pengujian, serta distribusinya berdasarkan posisi dominan truk pada lajur kiri atau kanan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui proporsi kendaraan berat yang menggunakan lajur sesuai maupun yang melanggar. Informasi ini ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Kendaraan Truk Berdasarkan Lajur

Kategori Posisi Truk	Jumlah Truk
Truk Lajur Kiri	5
Truk Lajur Kanan	3
Total Truk	8

Berdasarkan Tabel 2, dapat diketahui bahwa dari total 8 truk yang terdeteksi oleh sistem, sebanyak 3 truk (37,5%) teridentifikasi berada di lajur kanan yang seharusnya tidak digunakan oleh kendaraan berat. Sementara itu, 5 truk (62,5%) terpantau berada di lajur kiri sesuai aturan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan posisi kendaraan berat dengan baik dan secara otomatis mengklasifikasikan pelanggaran lajur berdasarkan zona yang telah ditentukan.

Analisis Hasil dan Evaluasi Pengujian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi antara metode YOLO dan *Kalman Filter* mampu memberikan performa yang baik dalam mendeteksi dan melacak kendaraan di jalan tol, serta dalam mengidentifikasi dua jenis pelanggaran lalu lintas utama, yaitu pelanggaran kecepatan dan pelanggaran lajur kanan oleh kendaraan berat. Pembahasan pada bagian ini akan menguraikan analisis terhadap hasil pelatihan dan pengujian model deteksi objek, efektivitas pelacakan menggunakan *Kalman Filter*, serta keakuratan sistem dalam menghitung kecepatan dan mendeteksi pelanggaran.

Berdasarkan hasil pengujian model *epoch* 100, terhadap 60 gambar uji dengan total 549 *instance* objek, performa deteksi model YOLOv11 ditunjukkan melalui sejumlah metrik evaluasi utama, yaitu *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score*, serta *mAP@50* dan *mAP@50–95*.

Secara keseluruhan, model mencapai *accuracy* sebesar 83,97%, yang menunjukkan bahwa proporsi prediksi yang benar cukup tinggi. *Precision* sebesar 0.702 dan *recall* sebesar 0.757 mengindikasikan bahwa model cukup akurat dalam mengidentifikasi objek, serta mampu mendeteksi sebagian besar objek yang ada. *F1-score* sebesar 0.758 menunjukkan keseimbangan antara ketepatan dan kelengkapan deteksi. Nilai *mAP@50* sebesar 0.758 dan *mAP@50–95* sebesar 0.415 memperlihatkan bahwa prediksi *bounding box* cukup presisi pada berbagai ambang IoU.

Untuk kelas *Car*, model diuji pada 51 gambar dengan 436 *instance*, menghasilkan *accuracy* sebesar 85,55%. Nilai *precision* sebesar 0.763 dan *recall* sebesar 0.803 menunjukkan bahwa model sangat baik dalam mendeteksi mobil dengan tingkat kesalahan klasifikasi yang rendah. *F1-score* sebesar 0.783 mencerminkan keseimbangan yang solid, didukung oleh mAP@50 sebesar 0.801 dan mAP@50–95 sebesar 0.457, yang menunjukkan akurasi spasial deteksi mobil cukup tinggi.

Sedangkan untuk kelas *Truck*, dengan 40 gambar dan 113 *instance*, model mencatat *accuracy* sebesar 77,87%. Meskipun lebih rendah dibanding kelas mobil, model masih menunjukkan performa deteksi yang cukup baik dengan *precision* sebesar 0.641, *recall* sebesar 0.711, dan *F1-score* sebesar 0.675. Nilai mAP@50 sebesar 0.715 dan mAP@50–95 sebesar 0.373 memperlihatkan bahwa meskipun performa pendeteksian truk lebih rendah, model tetap mampu mengidentifikasi kendaraan berat dengan akurasi spasial yang layak.

Perhitungan kecepatan dilakukan berdasarkan jumlah *frame* antara dua garis *RoI* dan nilai *frame rate* (FPS) dari video. Sistem dikategorikan mampu mengklasifikasikan kendaraan ke dalam tiga kelas kecepatan, yaitu *low speed*, normal, dan *overspeed*. Pengujian dengan empat variasi FPS (30, 60, 90 dan 120) menunjukkan bahwa sistem lebih akurat dalam menghitung kecepatan pada FPS tinggi. Hal ini karena semakin tinggi FPS, semakin banyak data *frame* yang tersedia untuk menangkap pergerakan objek, sehingga waktu tempuh dapat dihitung dengan lebih presisi. Pada FPS 30, semua kendaraan diklasifikasikan sebagai *low speed*, sedangkan pada FPS 120 sistem mampu mengidentifikasi kendaraan dengan kategori *overspeed*.

Selain pelanggaran kecepatan, sistem juga diuji untuk mendeteksi pelanggaran penggunaan lajur oleh kendaraan berat. Sistem berhasil mengidentifikasi truk yang melintas di lajur kanan, yang seharusnya diperuntukkan bagi kendaraan cepat. Deteksi dilakukan dengan menganalisis posisi *bounding box* truk terhadap zona lajur kanan dalam *frame* video. Dengan pelacakan *Kalman Filter*, sistem mampu mengonfirmasi bahwa kendaraan tersebut memang berada di lajur kanan selama waktu tertentu, dan bukan hanya melintas sebentar karena perubahan jalur.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan performa yang baik dalam dua aspek utama pengawasan lalu lintas: kecepatan dan penggunaan lajur. Penggunaan YOLO memungkinkan deteksi objek dengan akurasi tinggi, sementara *Kalman Filter* memberikan kestabilan pelacakan yang dibutuhkan untuk analisis berbasis waktu dan posisi. Meskipun masih terdapat keterbatasan seperti penurunan performa pada FPS rendah dan kesulitan mendeteksi objek truk secara konsisten, hasil penelitian ini membuktikan

bahwa integrasi deteksi objek dan pelacakan dapat digunakan sebagai dasar sistem pemantauan pelanggaran lalu lintas berbasis video yang otomatis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem deteksi pelanggaran lalu lintas di jalan tol menggunakan kombinasi YOLO dan *Kalman Filter*. Sistem mampu mendeteksi dan melacak kendaraan secara otomatis dari rekaman CCTV jalan tol. Sistem ini fokus pada dua jenis pelanggaran lalu lintas, yaitu pelanggaran kecepatan kendaraan dan pelanggaran penggunaan lajur kanan oleh truk. Sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi dua jenis kendaraan yaitu mobil (*car*) dan truk (*truck*) dengan Tingkat akurasi deteksi mencapai 83,97%, berdasarkan evaluasi model menggunakan *confusion matrix*, *precision*, *recall* dan *f1-score*. Deteksi pelanggaran lajur oleh truk juga berhasil dilakukan. Dari total 8 truk yang terdeteksi, 3 truk (37,5%) berada di lajur kanan dan diklasifikasikan sebagai pelanggaran. Sistem mampu menandai zona pelanggaran berdasarkan posisi *bounding box* truk secara otomatis tanpa intervensi manual. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan dapat dijadikan dasar untuk sistem pemantauan lalu lintas otomatis berbasis video, yang mampu mendeteksi pelanggaran dengan akurasi yang baik, dan berpotensi untuk di implementasikan dalam lingkungan jalan tol yang sebenarnya.

DAFTAR REFERENSI

- Ahmed, M., Khan, J., & Liu, X. (2024). Real-time object detection in complex traffic scenes using YOLOv7. *International Journal of Computer Vision and Intelligent Systems*, 12(1), 44–59. <https://doi.org/10.1007/s11263-024-01124-y>
- Diwan, A., Kumar, V., & Gupta, P. (2023). A comprehensive review on YOLO variants for object detection. *International Journal of Artificial Intelligence and Data Science*, 4(2), 100–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijartid.2023.05.005>
- Febrian, A., Heriansyah, R., & Romegar, Z. (2025). Deteksi pelanggaran lalu lintas pengendara sepeda motor menggunakan framework You Only Look Once (YOLO). [Artikel ilmiah, belum tersedia nama jurnal/doi].
- Heriansyah, R., Verano, D. A., & Mair, Z. R. (2024). Deteksi penyakit diabetes retinopathy menggunakan citra digital dengan metode convolutional neural network (CNN). *Prosiding SNAST*, 311–320. <https://doi.org/10.34151/prosidingsnast.v1i1.5120>
- Mair, Z. R. (2024). Convolutional neural network analysis on handwriting patterns and its relationship to personality: A systematical review. *Journal of Artificial Intelligence Research and Applications*, 8(2), 145–162.

- Mair, Z. R., & Irfani, M. H. (2023). Permainan INGBAS (gunting, batu, kertas) menggunakan arsitektur convolutional neural network. *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, 10(1), 1019–1026.
- Mair, Z. R., & Rahmanda, M. A. (2025). Perbandingan versi terbaik YOLO dalam mendeteksi jarak spasi antar baris tulisan tangan. *Jurnal Sains, Nalar, dan Aplikasi Teknologi Informasi*, 4(2), 103–110. <https://doi.org/10.20885/snati.v4.i2.40414>
- Pasemah, M. H. (2021). *Balancing robot dengan sistem kendali proporsional integral derivatif (PID) dan Kalman filter*. [Tugas akhir].
- Putri, R. N. (2020). Perilaku pengemudi dan kecelakaan di jalan tol: Kajian empiris. *Jurnal Transportasi dan Keselamatan*, 5(2), 101–110. <https://doi.org/10.21043/jtk.v5i2.11234>
- Rahmawati, R., & Adi, D. (2017). Penerapan Kalman filter pada sistem pelacakan objek bergerak. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 5(3), 423–430. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.5.3.423-430>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 779–788). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
- Saputra, A. (2024). Prediction passenger numbers in light rail transit using seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA). *Przegląd Elektrotechniczny*, 1(10), 45–47. <https://doi.org/10.15199/48.2024.10.07>
- Sri Bintang, M. (2025). Efektivitas CCTV dalam pengawasan lalu lintas di Jalan Tol Trans Sumatera. *Jurnal Sistem Transportasi Indonesia*, 6(1), 1–10.
- Sudirman, H. (2014). Pengembangan infrastruktur jalan tol dan dampaknya terhadap perekonomian wilayah. *Jurnal Infrastruktur dan Transportasi*, 2(1), 25–38. <https://doi.org/10.14710/jit.2.1.25-38>
- Wicaksono, R., Prasetyo, D., & Nugroho, S. (2020). Review Kalman filter dalam sistem deteksi dan pelacakan objek. *Jurnal Teknologi dan Informasi*, 11(1), 22–30. <https://doi.org/10.4710/jti.11.1.22-30>
- Zhandy, Z., Tungadi, E., & Raharjo, M. F. (2023). Aplikasi monitoring pelanggaran lalu lintas di jalan tol menggunakan YOLOv5. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 11(2), 65–72. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.11.2.65-72>