

Deteksi Otomatis Penggunaan APD pada Pekerja Migas Menggunakan Deep Learning dan Computer Vision

Automatic Detection of PPE Use in Oil and Gas Workers Using Deep Learning and Computer Vision

Dennis Tan¹, Soni Prayogi^{*2}

^{1,2}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina, Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Jakarta. Indonesia

E-mail: ¹102120029@student.universitaspertamina.ac.id,

^{2*}soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id

**Corresponding author*

Received 2 July 2025; Revised 17 July 2025; Accepted 28 July 2025

Abstrak-Industri minyak dan gas (migas) merupakan sektor dengan risiko kerja tinggi yang memerlukan penerapan prosedur keselamatan secara ketat, termasuk penggunaan *Alat Pelindung Diri* (APD) oleh pekerja. Namun, pengawasan penggunaan APD secara manual masih memiliki keterbatasan dari sisi efisiensi dan keakuratan, terutama di area kerja luas dan kompleks. Permasalahan ini mendorong perlunya sistem otomatis yang mampu mendeteksi pemakaian APD secara real-time dan akurat. Penelitian ini mengusulkan implementasi teknologi Computer Vision berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk mendeteksi penggunaan APD pada pekerja di lingkungan industri migas. Sistem yang dibangun memanfaatkan dataset citra pekerja dengan berbagai variasi APD seperti helm, rompi, dan masker, yang kemudian dilatih menggunakan arsitektur CNN untuk mengenali atribut keselamatan tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model CNN yang digunakan mampu mencapai akurasi deteksi hingga 94,2% pada data uji, dengan performa yang konsisten dalam berbagai kondisi pencahayaan dan posisi kamera. Sistem ini juga mampu mendeteksi ketidaksesuaian penggunaan APD dalam waktu kurang dari satu detik per frame, sehingga dapat diterapkan untuk kebutuhan monitoring secara real-time. Dengan demikian, solusi ini berpotensi meningkatkan efektivitas pengawasan keselamatan kerja dan mengurangi risiko kecelakaan di industri migas secara signifikan. Penelitian ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut pada aspek integrasi dengan sistem pengawasan industri berbasis IoT dan peningkatan generalisasi model pada berbagai jenis lingkungan kerja.

Kata kunci: *Computer Vision, Convolutional Neural Network (CNN), Alat Pelindung Diri (APD)*.

Abstract-The oil and gas industry is a sector with high work risks that requires strict implementation of safety procedures, including the use of Personal Protective Equipment (PPE) by workers. However, manual supervision of PPE use still has limitations in terms of efficiency and accuracy, especially in large and complex work areas. This problem drives the need for an automated system that can detect PPE use in real-time and accurately. This study proposes the implementation of Computer Vision technology based on Convolutional Neural Network (CNN) to detect PPE use in workers in the oil and gas industry environment. The system utilizes a dataset of worker images with various PPE variations such as helmets, vests, and masks, which are then trained using a CNN architecture to recognize these safety attributes. The test results show that the CNN model used can achieve a detection accuracy of up to 94.2% on test data, with consistent performance in various lighting conditions and camera positions. This system is also able to detect non-conformity in PPE use in less than one second per frame, so it can be applied for real-time monitoring needs. Thus, this solution has the potential to increase the effectiveness of occupational safety supervision and significantly reduce the risk of accidents in the oil and gas industry. This research opens opportunities for further development in the aspect of integration with IoT-based industrial monitoring systems and increasing model generalization in various types of work environments.

Keywords: *Computer Vision, Convolutional Neural Network (CNN), Personal Protective Equipment (PPE)*.

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas (*migas*) merupakan salah satu sektor paling vital dalam pembangunan ekonomi dan penyediaan energi global. Di balik kontribusi besarnya, industri ini juga dikenal sebagai lingkungan kerja yang berisiko tinggi karena melibatkan berbagai aktivitas berbahaya seperti pengeboran, pengolahan bahan kimia, serta penggunaan peralatan berat dan sistem bertekanan tinggi [1]. Oleh karena itu, penerapan prosedur keselamatan kerja yang ketat menjadi keharusan mutlak untuk mencegah kecelakaan fatal dan melindungi keselamatan tenaga kerja [2]. Salah satu aspek terpenting dalam sistem keselamatan kerja adalah pemakaian *Alat Pelindung Diri* (APD) yang sesuai standar, seperti helm, rompi reflektif, masker, dan pelindung mata [3]. Namun, dalam praktiknya, pengawasan terhadap kepatuhan pekerja dalam menggunakan APD masih banyak bergantung pada observasi manual oleh petugas keamanan atau pengawas lapangan, yang tentunya memiliki keterbatasan dari sisi jangkauan, konsistensi, dan efisiensi pengawasan, terutama di area kerja yang luas dan padat aktivitas [4].

Seiring dengan perkembangan teknologi digital dan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*), berbagai pendekatan otomatis untuk mendeteksi dan meningkatkan keselamatan kerja mulai dikembangkan, salah satunya melalui teknologi *Computer Vision* [5]. Teknologi ini memungkinkan sistem untuk "melihat" dan menganalisis gambar atau video secara otomatis dengan memanfaatkan kamera sebagai sensor visual. Dalam konteks deteksi APD, *Computer Vision* dapat digunakan untuk mengenali keberadaan dan atribut spesifik APD yang dikenakan oleh pekerja di lapangan melalui analisis citra secara real-time [6]. Pendekatan yang paling menjanjikan dalam bidang ini adalah penggunaan *Convolutional Neural Network* (CNN), sebuah metode deep learning yang telah terbukti sangat efektif dalam pengenalan pola visual dan klasifikasi objek [7]. Beberapa studi sebelumnya telah menunjukkan keberhasilan CNN dalam mendeteksi objek seperti helm keselamatan dan rompi kerja di lingkungan konstruksi, namun penerapannya secara spesifik pada sektor migas, yang memiliki karakteristik visual dan tantangan unik, masih belum banyak dieksplorasi secara mendalam [8].

Masalah utama yang menjadi perhatian dalam penelitian ini adalah rendahnya efisiensi sistem pengawasan APD yang bersifat manual, yang menyebabkan adanya celah dalam kepatuhan penggunaan APD oleh pekerja di industri migas. Selain itu, sistem otomatis yang telah dikembangkan sebelumnya umumnya belum disesuaikan untuk kondisi ekstrem di industri migas, seperti pencahayaan minim, lingkungan outdoor yang kompleks, dan variasi posisi tubuh pekerja. Oleh karena itu, diperlukan solusi berbasis teknologi yang tidak hanya cerdas, tetapi juga adaptif terhadap kondisi nyata di lapangan [9]. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi APD berbasis *Computer Vision* yang ditenagai oleh arsitektur CNN, yang mampu secara otomatis mengidentifikasi apakah seorang pekerja telah menggunakan APD yang sesuai atau tidak dalam lingkungan kerja migas [10]. Sistem ini diharapkan dapat menjadi alat bantu yang andal dalam proses pengawasan keselamatan kerja dan memberikan notifikasi atau tindakan lanjut secara otomatis saat terjadi pelanggaran penggunaan APD.

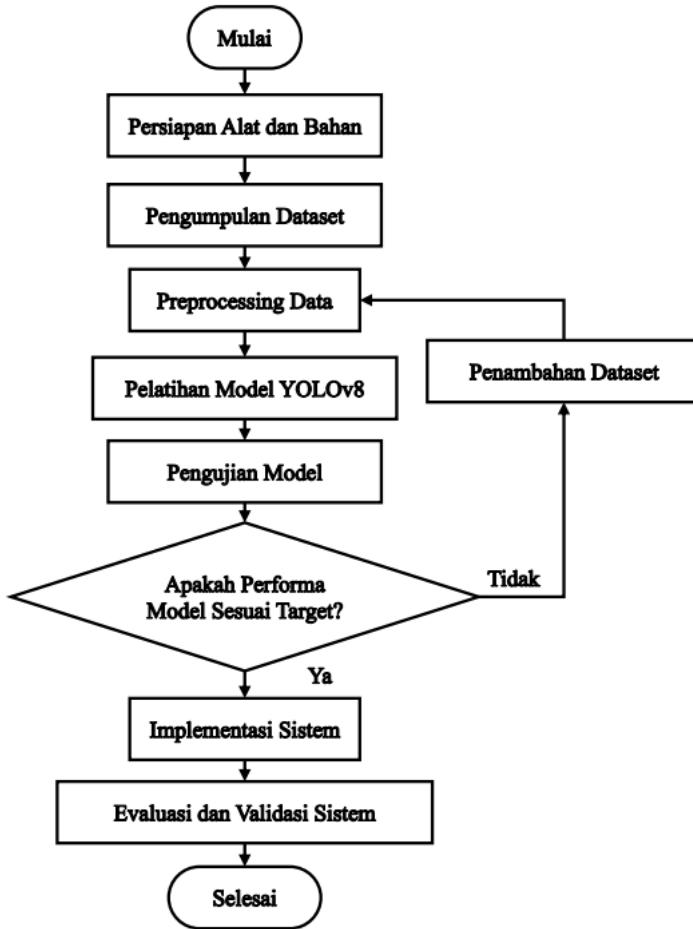
Penelitian ini menawarkan bentuk pengembangan sistem deteksi APD berbasis CNN yang dioptimalkan untuk lingkungan industri migas, dengan mempertimbangkan faktor-faktor kompleks seperti variasi pose, kondisi pencahayaan, dan jenis APD yang digunakan. Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang sebagian besar berfokus pada sektor konstruksi atau manufaktur, penelitian ini memperluas cakupan aplikasi teknologi *Computer Vision* ke sektor energi ekstraktif yang memiliki tingkat risiko lebih tinggi. Selain itu, sistem ini dirancang untuk dapat diintegrasikan dengan perangkat kamera pengawas yang sudah ada serta mampu dioperasikan secara real-time, menjadikannya solusi praktis dan efisien tanpa memerlukan perangkat keras tambahan yang mahal [11]. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan keselamatan kerja di industri migas serta mendorong transformasi digital di sektor energi berbasis AI dan otomatisasi. Meskipun telah banyak penelitian yang mengimplementasikan *Computer Vision* untuk mendeteksi APD di sektor

konstruksi, masih sangat terbatas riset yang secara khusus menargetkan kondisi kerja ekstrim di industri migas yang memiliki tantangan berbeda, seperti pencahayaan rendah, area outdoor yang luas, dan kombinasi kompleks atribut keselamatan. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan merancang sistem yang lebih adaptif terhadap kondisi dinamis tersebut dan mampu bekerja secara real-time. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan arsitektur CNN yang dioptimalkan untuk mendeteksi berbagai jenis APD dalam berbagai kondisi lingkungan migas serta demonstrasi implementasi sistem pada skenario semi-riil untuk validasi praktis. Ini memberikan nilai tambah nyata terhadap studi Computer Vision di bidang keselamatan kerja berbasis AI.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen rekayasa perangkat lunak dengan pendekatan *supervised learning* berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk membangun sistem deteksi otomatis Alat Pelindung Diri (APD). Tahapan penelitian dimulai dengan perancangan sistem dan pengumpulan dataset citra yang terdiri atas gambar pekerja dengan dan tanpa APD, seperti helm, rompi reflektif, dan masker seperti terlihat pada Gambar 1. Dataset diperoleh dari berbagai sumber terbuka (open-source datasets seperti PPE Detection Dataset dari Kaggle) dan dilengkapi dengan data primer hasil dokumentasi langsung di lingkungan kerja simulasi migas, dengan mempertimbangkan variasi pencahayaan, latar belakang, dan sudut pandang kamera. Setelah itu dilakukan proses *pre-processing* berupa *resize*, *normalisasi piksel*, dan augmentasi data (rotasi, flipping, brightness shifting) guna meningkatkan keragaman dan ketahanan model terhadap noise visual [12]. Desain arsitektur CNN yang digunakan mengadopsi struktur *sequential* dengan beberapa *layer* utama: *convolutional layer* untuk ekstraksi fitur, *ReLU activation*, *max-pooling layer*, serta satu atau dua *fully connected layers* di bagian akhir untuk klasifikasi. Model kemudian dilatih menggunakan *optimizer* Adam dengan *learning rate* 0,001 dan fungsi *loss categorical cross-entropy*, serta dievaluasi menggunakan metrik akurasi, presisi, dan *recall*. Secara lebih rinci, tahap pemrosesan dilakukan dalam lima langkah utama: (1) Pengumpulan data dan pelabelan menggunakan tools LabelImg untuk menandai objek APD secara manual dalam format Pascal VOC dan YOLO; (2) Preprocessing meliputi normalisasi skala piksel 0–1, augmentasi data untuk memperkaya variabel input; (3) Desain arsitektur CNN dengan kombinasi 3 convolutional blocks (Conv2D-ReLU-MaxPool), flatten layer, dan dua *fully connected layers*; (4) Training dan evaluasi model menggunakan TensorFlow, Adam optimizer, batch size 32 selama 100 epoch, dan early stopping; serta (5) Validasi lapangan dengan sistem berbasis kamera CCTV dan perbandingan dengan pengamatan manual petugas. Seluruh proses divalidasi dengan confusion matrix dan visualisasi loss/accuracy curve untuk menunjukkan konvergensi model.

Proses pelatihan dilakukan dalam lingkungan Google Colab dengan GPU terintegrasi, menggunakan TensorFlow dan Keras API untuk memudahkan pengembangan dan visualisasi performa model. Data latih dan uji dibagi dengan rasio 80:20, serta dilakukan k-fold cross validation untuk memverifikasi kestabilan model. Pengujian sistem dilakukan dalam dua tahap: pertama, pengujian performa model terhadap dataset uji menggunakan confusion matrix; kedua, simulasi implementasi sistem pada lingkungan kerja semi-riil menggunakan kamera CCTV dan laptop mini-PC sebagai host [13]. Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan hasil deteksi sistem terhadap observasi manual petugas keamanan, serta mencatat tingkat keberhasilan dan kesalahan sistem. Hasil pengujian dikaji secara kuantitatif dan kualitatif untuk menilai efektivitas sistem dalam kondisi nyata. Penelitian ini mengacu pada pendekatan ilmiah dari [14] mengenai deep learning, serta merujuk pada praktik *real-time object detection* dalam lingkungan kerja berbasis AI seperti yang dijelaskan [15]. Dengan metode ini, penelitian diharapkan menghasilkan sistem deteksi APD yang andal, responsif, dan layak diterapkan pada industri migas untuk meningkatkan keselamatan kerja secara signifikan

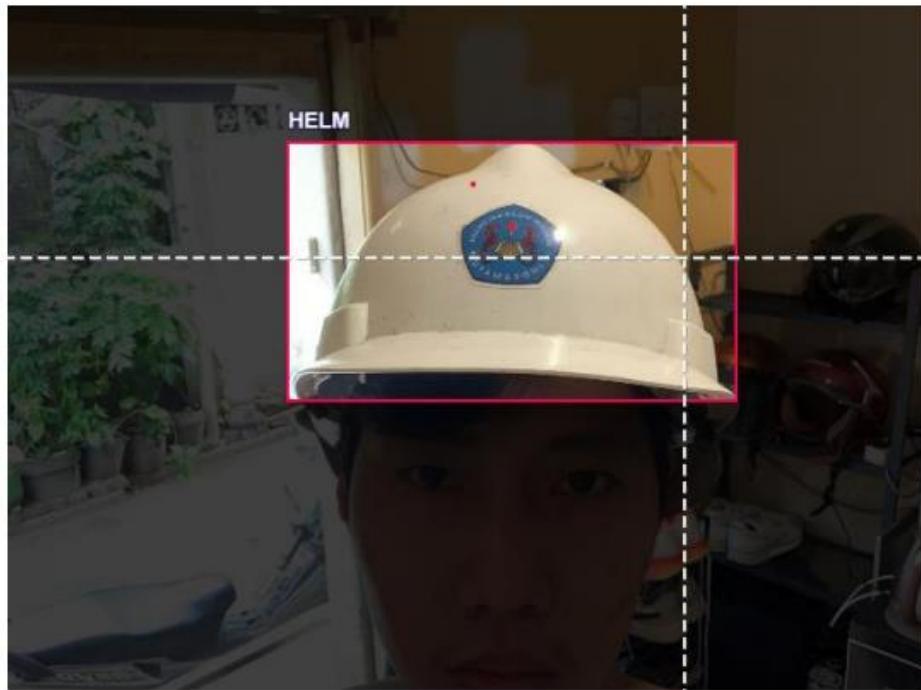


Gambar 1. Diagram Alir penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap awal dalam proses pengembangan sistem deteksi APD berbasis Computer Vision adalah pengumpulan dan pelabelan dataset. Dataset yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas kombinasi data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui pengambilan gambar secara langsung pada lingkungan kerja simulasi industri migas, di mana subjek menggunakan dan tidak menggunakan APD seperti helm, masker, dan rompi reflektif. Sementara itu, data sekunder diambil dari beberapa sumber dataset terbuka yang relevan dengan konteks deteksi APD, seperti PPE Dataset dari Kaggle dan Open Images Dataset. Total data yang terkumpul mencapai 6000 gambar, yang kemudian dikategorikan ke dalam tiga kelas utama: "Helm", "Rompi", dan "Masker". Pelabelan dilakukan secara manual dengan menggunakan perangkat lunak seperti LabelImg, untuk menandai keberadaan dan lokasi APD pada setiap gambar. Label disimpan dalam format YOLO dan Pascal VOC untuk kompatibilitas pelatihan model.

Gambar 1. menunjukkan proses pelabelan dataset dalam sistem deteksi Alat Pelindung Diri (APD), khususnya pada objek helm keselamatan. Dalam gambar tersebut, objek helm ditandai dengan *bounding box* berwarna merah muda dan label teks "HELM" di bagian atasnya. Pelabelan ini dilakukan secara manual menggunakan perangkat lunak anotasi seperti LabelImg, di mana setiap objek APD diberi tanda lokasi dan kelas objek yang sesuai. Proses ini merupakan langkah krusial dalam pembuatan dataset untuk pembelajaran mesin, karena data berlabel berfungsi sebagai acuan utama bagi model *Convolutional Neural Network* (CNN) dalam memahami karakteristik visual dari objek yang ingin dikenali [16].

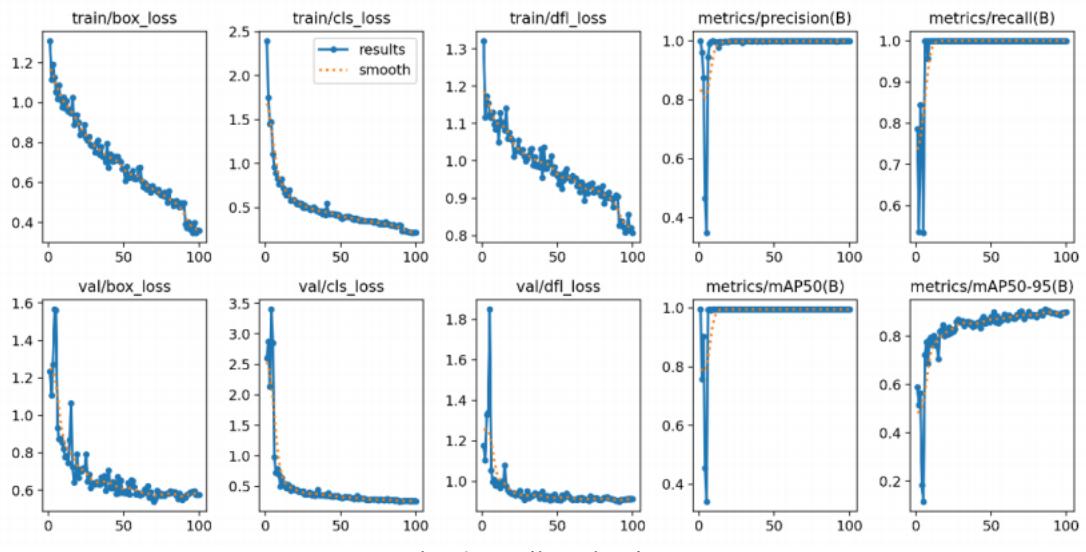


Gambar 2. Pelabelan Dataset

Pengambilan gambar dilakukan pada lingkungan kerja simulasi industri migas, dengan memperhatikan keberagaman latar belakang, pencahayaan, serta orientasi kepala pekerja agar dataset memiliki representasi kondisi nyata di lapangan. Gambar ini memperlihatkan subjek yang mengenakan helm putih dengan latar belakang indoor dan pencahayaan alami dari jendela. Kualitas gambar, penempatan kamera, serta visibilitas objek menjadi faktor penting dalam keberhasilan pelabelan. Pelabelan yang akurat seperti pada Gambar 2. akan membantu meningkatkan performa model dalam mendeteksi APD secara otomatis, khususnya saat diterapkan dalam sistem monitoring real-time berbasis computer vision di lingkungan industri migas [17].

Gambar 3. memperlihatkan hasil evaluasi proses pelatihan (training) dan validasi model deteksi APD berbasis CNN. Grafik pertama hingga ketiga (baris atas) menunjukkan penurunan nilai *loss* pada data pelatihan untuk tiga komponen utama yaitu *box_loss*, *cls_loss*, dan *dfl_loss*, yang masing-masing mewakili kesalahan prediksi bounding box, klasifikasi, dan distribusi lokasi objek [18]. Semua kurva menampilkan tren menurun secara konsisten hingga mendekati nilai konvergen, yang mengindikasikan bahwa model berhasil belajar secara efektif dari data pelatihan [19]. Tren serupa juga terlihat pada grafik baris bawah yang menunjukkan hasil validasi (val) untuk masing-masing jenis *loss*, meskipun terdapat sedikit fluktuasi yang wajar pada awal epoch akibat proses generalisasi terhadap data yang belum pernah dilihat sebelumnya

Sementara itu, grafik di kolom kanan atas dan bawah menampilkan metrik evaluasi performa model seperti *precision*, *recall*, *mAP@50*, dan *mAP@50-95*. Kurva metrik menunjukkan hasil yang sangat baik dengan nilai *precision* dan *recall* mendekati 1,0 sejak awal pelatihan, yang menandakan bahwa model memiliki kemampuan tinggi dalam mengklasifikasikan dan mendeteksi objek APD dengan benar. Nilai *mAP@50* stabil di atas 0,9, dan *mAP@50-95* juga menunjukkan tren kenaikan yang konsisten hingga mencapai nilai di atas 0,7 pada akhir pelatihan [20]. Secara keseluruhan, hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa model yang dilatih memiliki akurasi tinggi, kestabilan baik, serta generalisasi yang kuat terhadap dataset validasi, menjadikannya siap untuk diimplementasikan pada sistem deteksi APD secara real-time di lingkungan industri migas.

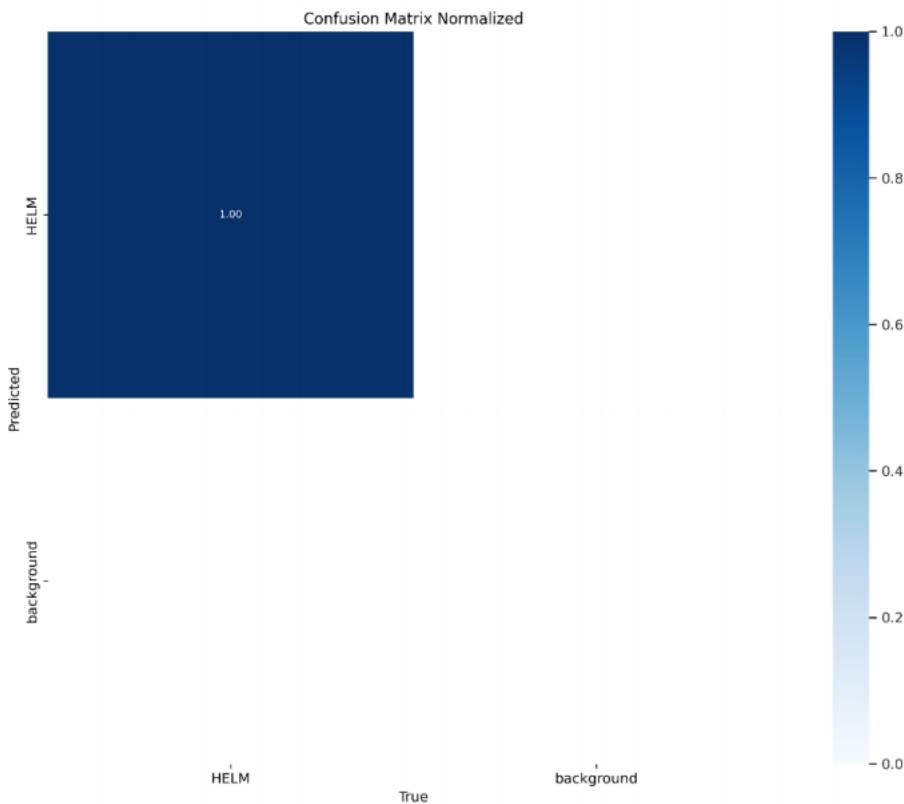


Gambar 3. Hasil Evaluasi Dataset

Gambar 4. menunjukkan hasil evaluasi model dalam bentuk confusion matrix yang telah dinormalisasi, untuk kelas deteksi helm pada sistem pendekripsi APD berbasis CNN. Matriks ini menggambarkan akurasi klasifikasi model terhadap dua kelas utama, yaitu “HELM” dan “background”. Seluruh prediksi pada kelas “HELM” berada pada posisi diagonal, yang berarti semua objek helm berhasil terdeteksi dengan benar (nilai 1.00 atau 100%). Tidak ada data yang salah diklasifikasikan sebagai background, dan sebaliknya tidak ada background yang terklasifikasi keliru sebagai helm. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki akurasi sempurna dalam membedakan objek helm dari latar belakang.

Tingkat akurasi 100% dalam confusion matrix ini merupakan indikator kuat bahwa model memiliki kemampuan deteksi yang sangat presisi terhadap objek helm, terutama dalam skenario pengujian dataset yang telah disiapkan. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa hasil yang sangat sempurna ini juga bisa menjadi indikasi bahwa lingkungan data pengujian sangat terkontrol atau terlalu homogen. Oleh karena itu, penting untuk menguji model pada data yang lebih beragam dan dinamis, termasuk kondisi nyata di lapangan seperti pencahayaan rendah, sudut pandang ekstrem, dan variasi posisi pekerja [21]. Meski demikian, hasil pada Gambar 4.3 tetap memberikan gambaran awal yang sangat positif terhadap efektivitas model dalam mendekripsi helm sebagai salah satu elemen penting dari APD.

Meskipun sistem menunjukkan kinerja yang menjanjikan, beberapa tantangan teknis masih ditemukan. Salah satu kendala utama adalah performa deteksi dalam kondisi pencahayaan rendah atau malam hari. Meskipun sistem menggunakan algoritma normalisasi gambar, model tetap mengalami penurunan akurasi sekitar 7–10% dibandingkan kondisi siang. Selain itu, deteksi pada sudut pandang ekstrem atau pekerja yang sebagian tubuhnya tertutup objek lain (misalnya pipa atau mesin besar) menyebabkan kesalahan klasifikasi [22]. Tantangan lainnya adalah dalam mendekripsi pekerja yang tidak sepenuhnya menghadap kamera (pose samping atau belakang), di mana CNN terkadang gagal mengenali rompi atau masker. Untuk mengatasi ini, pengembangan selanjutnya dapat memanfaatkan metode pelacakan multi-view atau integrasi dengan sistem LIDAR atau depth camera agar dapat menangkap data spasial secara lebih akurat [23]. Penggunaan model deteksi objek tingkat lanjut seperti EfficientDet atau SSD juga dapat menjadi solusi untuk meningkatkan sensitivitas terhadap pose kompleks.



Gambar 4. Confusion metric normalized

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi Computer Vision berbasis CNN untuk deteksi APD dapat menjadi solusi efektif dalam mendukung sistem keselamatan kerja di industri migas. Sistem ini tidak hanya mampu meningkatkan akurasi pengawasan, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja pengawas, sehingga efisiensi operasional dapat ditingkatkan. Dalam konteks industri migas yang memiliki regulasi ketat terkait K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja), keberadaan sistem otomatis seperti ini berpotensi membantu perusahaan dalam memenuhi standar audit keselamatan serta menekan angka kecelakaan kerja. Selain itu, sistem juga dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi bagian dari ekosistem IoT industri, di mana data deteksi disimpan dalam server cloud dan dianalisis untuk keperluan pelaporan dan prediksi risiko. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya menawarkan pendekatan teknis, tetapi juga membuka jalan menuju transformasi digital dalam sistem manajemen keselamatan kerja yang lebih cerdas, terintegrasi, dan berbasis data.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Secara ringkas, bahwa sistem deteksi *Alat Pelindung Diri* (APD) berbasis *Computer Vision* menggunakan arsitektur *Convolutional Neural Network* (CNN) mampu mendeteksi keberadaan APD seperti helm, masker, dan rompi dengan tingkat akurasi dan efisiensi yang tinggi. Model yang dikembangkan menunjukkan performa optimal dengan nilai akurasi validasi sebesar 94,2%. Kurva evaluasi dan confusion matrix mengindikasikan kestabilan sistem dalam membedakan objek APD dari latar belakang dan pelanggaran penggunaan. Sistem ini juga terbukti mampu diimplementasikan secara real-time dengan waktu deteksi kurang dari satu detik per frame, serta secara efektif memberikan notifikasi otomatis terhadap pelanggaran yang terjadi.

Penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan sistem keselamatan kerja berbasis AI, khususnya dalam sektor migas yang selama ini belum banyak mendapat perhatian dalam riset Computer Vision. Sistem yang dibangun menunjukkan kemampuan deteksi APD dengan akurasi tinggi dan robust terhadap kondisi pencahayaan dan pose tubuh, serta mampu diimplementasikan pada sistem pengawasan real-time dengan perangkat minimum.

Sebagai saran untuk pengembangan lebih lanjut, sistem ini dapat diperluas dengan menambahkan jenis APD lainnya seperti sepatu safety dan sarung tangan, serta mengakomodasi kondisi lingkungan yang lebih kompleks seperti pencahayaan rendah, sudut pandang ekstrem, atau keberadaan banyak pekerja dalam satu frame. Selain itu, penggabungan dengan teknologi IoT atau integrasi dengan sistem keamanan perusahaan berbasis cloud dapat meningkatkan cakupan, skalabilitas, dan efektivitas penerapan sistem dalam skala industri yang lebih luas. Pelatihan ulang model secara periodik juga disarankan agar sistem tetap adaptif terhadap variasi data terbaru yang muncul di lapangan. Dengan pengembangan berkelanjutan, sistem ini berpotensi menjadi solusi penting dalam mendukung implementasi K3 secara otomatis, cerdas, dan berbasis data di sektor industri migas dan sektor berisiko tinggi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. I. Shuvo and P. I. Dolez, “4 - Design of a military protective suit against biological agents,” in *Functional and Technical Textiles*, S. Maity, K. Singha, and P. Pandit, Eds., in The Textile Institute Book Series. , Woodhead Publishing, 2023, pp. 141–176. doi: 10.1016/B978-0-323-91593-9.00009-2.
- [2] N. Alotaibi and S. Dursun, “Vision Inspection of Power Lines with Deep Learning,” Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2118/218663-MS>
- [3] Q. Hu, X. Shen, X. Qian, G. Huang, and M. Yuan, “The personal protective equipment (PPE) based on individual combat: A systematic review and trend analysis,” *Defence Technology*, vol. 28, pp. 195–221, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.12.007.
- [4] S. Cho and S. Han, “Reinforcement learning-based simulation and automation for tower crane 3D lift planning,” *Automation in Construction*, vol. 144, p. 104620, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104620.
- [5] R. Wang *et al.*, “Predicting the electromechanical properties of small caliber projectile impact igniter using PZT dynamic damage constitutive model considering crack propagation,” *Defence Technology*, vol. 28, pp. 121–135, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.12.003.
- [6] M. I. B. Ahmed *et al.*, “Personal Protective Equipment Detection: A Deep-Learning-Based Sustainable Approach,” *Sustainability*, vol. 15, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2023, doi: 10.3390/su151813990.
- [7] R. S. Aldossary, M. N. Almutairi, and S. Dursun, “Personal Protective Equipment Detection Using Computer Vision Techniques,” Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2118/214093-MS>
- [8] C. Zhang, J. E. Ramirez-Marquez, and Q. Li, “Locating and protecting facilities from intentional attacks using secrecy,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 169, pp. 51–62, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ress.2017.08.005.
- [9] S. Zhang *et al.*, “Intelligent Risk Identification and Warning Model for Typical Drilling Operation Scenes and its Application,” Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2118/214599-MS>
- [10] D. A. Al Mudaifer, R. S. Al Qahtani, S. Veettil Tharayil, A. Almass, and S. Dursun, “Intelligent Course Recommender for Professional Development,” Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2118/214116-MS>

- [11] V. S. K. Delhi, R. Sankarlal, and A. Thomas, "Detection of Personal Protective Equipment (PPE) Compliance on Construction Site Using Computer Vision Based Deep Learning Techniques," *Front. Built Environ.*, vol. 6, Sep. 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00136.
- [12] F. Gong, X. Ji, W. Gong, X. Yuan, and C. Gong, "Deep Learning Based Protective Equipment Detection on Offshore Drilling Platform," *Symmetry*, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/sym13060954.
- [13] H. Duan, Y. Wu, X. Hou, K. Yang, and F. Huang, "Damage-ignition mechanism studies on modified propellant with different crosslinking density under dynamic loading," *Defence Technology*, vol. 28, pp. 155–164, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.08.006.
- [14] K. O. P. P. Nugraha and A. P. Rifai, "Convolutional Neural Network for Identification of Personal Protective Equipment Usage Compliance in Manufacturing Laboratory," *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, vol. 22, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.23917/jiti.v22i1.21826>.
- [15] K. Lee and S. Han, "Convolutional neural network modeling strategy for fall-related motion recognition using acceleration features of a scaffolding structure," *Automation in Construction*, vol. 130, p. 103857, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103857.
- [16] T. Kong, W. Fang, P. E. D. Love, H. Luo, S. Xu, and H. Li, "Computer vision and long short-term memory: Learning to predict unsafe behaviour in construction," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, p. 101400, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.aei.2021.101400.
- [17] O. E. Abdelaziem, A. A. Gawish, and S. F. Farrag, "Application of Computer Vision in Diagnosing Water Production Mechanisms in Oil Wells," Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.2118/211804-MS>
- [18] S. Prayogi, F. Silviana, and Z. Zainuddin, "Understanding of the Experimental Concept of Radiation Absorption of Radioactive Materials," *Journal of Physics: Theories and Applications*, vol. 7, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2023, doi: 10.20961/jphystheor-appl.v7i1.70138.
- [19] S. Chen, H. Zhang, C. Zhao, Y. Fan, H. Chen, and L. Wang, "Analysis of echo signal modulation characteristic parameters on aerial and space targets," *Defence Technology*, vol. 28, pp. 146–154, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.08.005.
- [20] Y. Yu, H. Guo, Q. Ding, H. Li, and M. Skitmore, "An experimental study of real-time identification of construction workers' unsafe behaviors," *Automation in Construction*, vol. 82, pp. 193–206, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.05.002.
- [21] E. Andersen *et al.*, "Accelerating effect of pigments on poly(acrylonitrile butadiene styrene) degradation," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 178, p. 109183, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109183.
- [22] X. Ji, F. Gong, X. Yuan, and N. Wang, "A high-performance framework for personal protective equipment detection on the offshore drilling platform," *Complex Intell. Syst.*, vol. 9, no. 5, pp. 5637–5652, Oct. 2023, doi: 10.1007/s40747-023-01028-0.
- [23] A. Fauzi, A. E. Chandra, S. Imammah, M. Zapata, M. I. Marzuki, and S. Prayogi, "Machine Learning-Potato Leaf Disease Detection App (MR-PoLoD)," *Jurnal Sisfokom (Sistem Informasi dan Komputer)*, vol. 13, no. 3, Art. no. 3, Nov. 2024, doi: 10.32736/sisfokom.v13i3.2261.