

LAPORAN PENELITIAN INTERNAL DOSEN
Progam Studi Teknik Industri Fakultas Saintek



Smart Camera for Personal Protective Equipment (PPE) Usage Detection
Using the YOLO-NAS Method for Occupational Safety and Health

Tim Peneliti:

Faisal Ashari., S.Pd., M.T

Risky Stighfarinata, M.T

Nayla Farikha Zahra

Dibiayai oleh:

Universitas Bojonegoro

UNIVERSITAS BOJONEGORO

2025

HALAMAN PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN PENDANAAN PERGURUAN TINGGI

- 1 **Judul Penelitian** : *Smart Camera for Personal Protective Equipment (PPE) Usage Detection Using the YOLO-NAS Method for Occupational Safety and Health*
- 2 **Tema** : Ergonomi, K3, dan Faktor Manusia
- 3 **Ketua Peneliti**
 - a. Nama Peneliti : Faisal Ashari, S.Pd., M.T.
 - b. NIDN : 07 1901 9501
 - c. Program Studi : Teknik Industri
 - d. E-mail : gaxes@gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : Rekayasa Sistem Pengembangan Produk
- 4 **Anggota Peneliti 1**
 - a. Nama : Rizky Stighfarrinata, S.ST., M.T.
(Dosen/Mahasiswa)
 - b. NIDN/NIM : 07 0809 9302
 - c. Program Studi : Teknik Industri
 - d. E-mail : stighfarrinatarizky@gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : Optimasi dan Simulasi Sistem
- 5 **Anggota Peneliti 2**
 - a. Nama : Nayla Farikha Zahra
(Dosen/Mahasiswa)
 - b. NIDN/NIM : 23262011040
 - c. Program Studi : Teknik Industri
 - d. E-mail : —
 - e. Bidang Keilmuan : Teknik Industri
- 6 **Jangka Waktu Penelitian** : 6 Bulan
- 7 **Lokasi Penelitian** : Kecamatan Bojonegoro, Kabupaten Bojonegoro
- 8 **Dana Diusulkan** : Rp 3.500.000,-

Bojonegoro, 8 Mei 2025

Mengetahui,

Ketua LPPM Universitas Bojonegoro



Dr. Laily Agustina Rahmawati, S.Si., M.Sc.
NIDN. 07 2108 8601

Ketua Penelitian

Faisal Ashari, S.Pd., M.T.
NIDN. 07 1901 9501

KATA PENGANTAR

Dengan rasa syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, penelitian berjudul "*Smart Camera for Personal Protective Equipment (PPE) Usage Detection Using the YOLO-NAS Method for Occupational Safety and Health*" ini berhasil disusun. Penelitian ini bertujuan mengembangkan solusi teknologi inovatif untuk meningkatkan pemantauan penggunaan Alat Pelindung Diri (PPE) guna mendukung keselamatan dan kesehatan kerja.

Di tengah kemajuan teknologi visi komputer dan kecerdasan buatan, penelitian ini diinisiasi sebagai respons terhadap tantangan signifikan dalam memastikan kepatuhan penggunaan PPE di lingkungan kerja. Fokus utama adalah merancang dan mengevaluasi sebuah "Smart Camera" yang memanfaatkan metode YOLO-NAS untuk deteksi penggunaan PPE secara otomatis dan real-time. Diharapkan sistem ini dapat menjadi solusi praktis yang meningkatkan efektivitas pemantauan dan berkontribusi nyata pada upaya peningkatan standar Occupational Safety and Health.

Penulis berharap penelitian ini memberikan sumbangsih positif dalam pengembangan teknologi deteksi otomatis dan, yang lebih penting, dalam memajukan budaya keselamatan kerja. Dengan niat tulus dan usaha sungguh-sungguh, semoga solusi inovatif ini bermanfaat luas. Penulis memohon maaf atas segala kekurangan dalam proposal ini dan terbuka untuk saran konstruktif, dengan harapan penelitian ini menjadi langkah awal menuju lingkungan kerja yang lebih aman melalui teknologi yang efektif.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	I
KATA PENGANTAR	II
DAFTAR ISI	III
RINGKASAN	IV
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Analisa Situasi.....	1
B. Permasalahan Mitra.....	3
 BAB II SOLUSI PERMASALAHAN	
A. Persoalan Prioritas.....	4
B. Jenis Luaran dari Solusi yang ditawarkan.....	4
B. Penelitian Terkait	4
 BAB III METODE PELAKSANAAN	
A. Alur Pengabdian Kepada Masyarakat.....	6
B. Pihak-Pihak	6
C. Metode dan Tahapan dalam Penerapan TTG	6
D. Partisipasi Mitra	7
E. Evaluasi Pelaksanaan dan Keberlanjutan Program	7
F. Tim	7
 BAB IV RENCANA LUARAN DAN TARGET CAPAIAN	
A. Rencana Luaran.....	9
 BAB V JADWAL DAN RENCANA ANGGARAN BIAYA	
A. Jadwal Pengabdian Kepada Masyarakat	11
B. Rencana Anggaran Biaya	11
 DAFTAR PUSTAKAN	12
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

DAFTAR GAMBAR

RINGKASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem *Intelligent Quality Control* berbasis *computer vision* dengan arsitektur *Neural Architecture Search* (NAS) untuk mendeteksi kelengkapan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) dalam industri. Penelitian ini penting mengingat tingginya angka kecelakaan dan penyakit akibat kerja, baik secara global maupun nasional.

Fokus utama penelitian adalah merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi tiga jenis APD, yaitu helm, rompi, dan sepatu safety, melalui input gambar dari webcam. Dataset APD diperoleh dari Roboflow, dianotasi, dan dilatih menggunakan framework SuperGradients di Google Colab untuk menghasilkan model deteksi dengan performa optimal.

Luaran dari penelitian ini berupa sistem deteksi APD real-time dengan akurasi tinggi, ditunjukkan melalui hasil precision 97,16%, recall 98,35%, F1-score 97,25%, dan mAP 96,07%, serta implementasi berbasis webcam dengan F1-score 94,84%. Hasil ini menunjukkan kemampuan NAS dalam menghasilkan model yang handal dan efektif.

Penelitian ini memiliki implikasi positif dalam mendukung keselamatan kerja melalui pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan. Diharapkan sistem ini dapat berkontribusi pada pengurangan risiko kecelakaan kerja serta meningkatkan kepatuhan penggunaan APD di lingkungan industri.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek fundamental yang krusial di setiap lingkungan kerja, tidak hanya untuk menjamin kesejahteraan pekerja tetapi juga signifikan dalam mempengaruhi produktivitas tenaga kerja (Maretnowati et al., 2020). Pentingnya K3 menjadi semakin vital, khususnya pada sektor-sektor dengan risiko tinggi seperti konstruksi, manufaktur, dan pertambangan, di mana penerapan K3 yang tepat menjadi inisiasi penting untuk mengendalikan potensi bahaya yang besar (Anas et al., 2021). Kegagalan dalam implementasi K3 dapat mengakibatkan kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja (PAK) dengan dampak negatif yang serius bagi pekerja, meliputi cedera fisik, gangguan kesehatan kronis, hingga konsekuensi psikologis dan sosial-ekonomi (Sulistyaningtyas et al., 2021). Lebih lanjut, bagi perusahaan, kelalaian dalam K3 dapat berujung pada berbagai kerugian signifikan, termasuk penurunan produktivitas, peningkatan biaya medis dan kompensasi, serta rusaknya reputasi perusahaan (Juniar & Latumahina, 2025).

Alat Pelindung Diri (APD) memegang peranan fundamental dalam sistem Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), terutama sebagai lapisan pertahanan terakhir bagi pekerja. Konsep hierarki pengendalian risiko K3 menempatkan APD pada tingkatan paling bawah setelah upaya eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, dan kontrol administratif.¹ Penempatan ini mengindikasikan bahwa APD digunakan ketika sumber bahaya belum sepenuhnya dapat dihilangkan atau dikendalikan melalui metode-metode yang lebih tinggi dalam hierarki tersebut.⁴ Meskipun demikian, pada banyak lingkungan kerja, khususnya di sektor-sektor dengan risiko tinggi seperti konstruksi, manufaktur, dan pertambangan, APD menjadi komponen vital yang tidak terpisahkan dari operasional sehari-hari.⁶ Pentingnya penerapan K3, termasuk penggunaan APD yang benar, tidak hanya berdampak pada keselamatan individu pekerja tetapi juga pada produktivitas dan keberlangsungan operasional perusahaan secara keseluruhan. Kegagalan dalam penerapan metode pengendalian risiko yang lebih tinggi seringkali meningkatkan urgensi dan ketergantungan pada APD, menjadikan kepatuhan penggunaannya sebagai titik kritis dalam mencegah cedera dan penyakit akibat kerja. Beragam jenis APD dirancang untuk memberikan proteksi spesifik terhadap berbagai potensi bahaya. Helm keselamatan (safety helmet) berfungsi melindungi kepala dari benturan benda jatuh atau paparan bahaya lainnya. Kacamata keselamatan (safety goggles) dirancang untuk melindungi mata dari partikel melayang, percikan bahan kimia, dan radiasi berbahaya.⁷ Sarung tangan keselamatan (safety gloves) memberikan perlindungan pada tangan dari risiko terpotong, terbakar, paparan bahan kimia, atau sengatan listrik, dengan jenis yang disesuaikan dengan potensi bahaya spesifik. Sepatu keselamatan (safety shoes) melindungi kaki dari risiko tertimpa benda berat, tertusuk benda tajam, tergelincir, serta paparan bahan kimia atau listrik. Sementara itu, masker pelindung atau respirator berfungsi untuk melindungi sistem pernapasan dari paparan debu, asap, uap, gas beracun, dan partikel berbahaya lainnya. Kompleksitas dalam pengelolaan APD timbul dari keberagaman jenis dan fungsi spesifik ini; kesalahan dalam pemilihan atau penggunaan APD yang tidak sesuai dengan risiko yang dihadapi

dapat memberikan ilusi keselamatan semu, padahal pekerja sejatinya masih terpapar bahaya.

Meskipun urgensi penggunaan APD sebagai benteng terakhir perlindungan telah diakui secara luas, tingkat kepatuhan pekerja terhadap penggunaan APD di berbagai sektor industri, termasuk di Indonesia, dilaporkan masih rendah. Berbagai studi menunjukkan bahwa kedisiplinan pekerja dalam menggunakan APD secara konsisten dan benar masih menjadi tantangan signifikan, yang berkontribusi pada tingginya angka kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja.¹ Rendahnya tingkat kepatuhan ini dipengaruhi oleh berbagai faktor yang kompleks. Salah satu faktor utama adalah ketidaknyamanan yang dirasakan pekerja saat menggunakan APD, seperti rasa panas, berat, pembatasan gerak, atau ukuran yang tidak sesuai, yang pada akhirnya mengurangi motivasi untuk menggunakan APD secara berkelanjutan. Faktor lainnya adalah kurangnya kesadaran dan pengetahuan pekerja mengenai pentingnya K3, fungsi spesifik APD dalam melindungi diri dari bahaya, serta konsekuensi serius yang dapat timbul akibat tidak menggunakan APD.¹ Selain itu, lemahnya sistem pengawasan dari pihak manajemen atau petugas K3, termasuk tidak adanya mekanisme penghargaan dan sanksi yang jelas terkait kepatuhan APD, turut memperburuk situasi ini. Metode pemantauan APD secara manual oleh petugas K3 juga memiliki berbagai keterbatasan inheren. Proses observasi langsung seringkali memakan waktu yang signifikan, terutama untuk area kerja yang luas dan jumlah pekerja yang banyak. Penilaian kepatuhan oleh petugas juga berpotensi subjektif dan tidak konsisten antar waktu atau antar petugas.¹² Cakupan area pengawasan pun seringkali terbatas, sehingga tidak semua pelanggaran dapat terdeteksi, dan adanya potensi human error akibat kelelahan atau kelalaian petugas dapat menyebabkan pengawasan menjadi tidak efektif dan tidak sistematis.¹² Keterbatasan dalam sistem pengawasan manual ini menciptakan sebuah siklus di mana faktor-faktor penyebab ketidakpatuhan tidak tertangani secara efektif, yang pada gilirannya dapat memicu "efek domino" di mana satu kelalaian kecil dalam pemantauan dapat berujung pada kecelakaan kerja dengan konsekuensi yang fatal.¹⁸

Untuk mengatasi berbagai keterbatasan yang melekat pada metode pemantauan APD secara manual, teknologi computer vision hadir sebagai solusi inovatif yang menjanjikan. Sebagai cabang dari kecerdasan buatan, computer vision memungkinkan sistem komputasi untuk "melihat", menganalisis, dan menginterpretasi informasi visual dari gambar atau video secara otomatis.¹⁹ Dalam konteks K3, teknologi ini dapat diaplikasikan untuk mengembangkan sistem pemantauan penggunaan APD yang lebih objektif, konsisten, dan efisien. Dengan memanfaatkan algoritma deep learning, sistem computer vision dapat dilatih untuk mengenali berbagai jenis APD seperti helm, rompi, masker, kacamata, dan sepatu keselamatan yang dikenakan oleh pekerja secara real-time melalui analisis rekaman dari kamera pengawas.¹⁹ Kemampuan deteksi real-time ini memberikan keunggulan signifikan dibandingkan observasi manusia, karena memungkinkan sistem untuk memberikan peringatan atau intervensi secara langsung ketika terdeteksi adanya ketidakpatuhan. Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penggunaan berbagai arsitektur deep learning, termasuk varian dari YOLO (You Only Look Once), untuk deteksi APD dan menunjukkan hasil akurasi yang cukup baik.¹⁹ Meskipun demikian, masih terdapat ruang untuk peningkatan lebih lanjut, terutama dalam hal peningkatan akurasi deteksi pada kondisi lingkungan yang beragam (misalnya, variasi pencahayaan, oklusi objek), optimalisasi efisiensi komputasional untuk pemrosesan data skala besar secara cepat, serta peningkatan

keandalan sistem secara keseluruhan.¹⁹ Perkembangan pesat dalam algoritma deteksi objek, seperti evolusi berkelanjutan dalam keluarga YOLO, menunjukkan bahwa bidang ini terus berupaya mengatasi limitasi yang ada, membuka peluang untuk solusi yang lebih canggih dan andal. Lebih jauh, implementasi computer vision tidak hanya menawarkan solusi teknis untuk deteksi, tetapi juga berpotensi menyediakan data kepatuhan yang objektif dan berkelanjutan, yang dapat dimanfaatkan untuk merancang intervensi K3 yang lebih terarah dan mengevaluasi efektivitas program keselamatan secara keseluruhan.

Penelitian ini mengusulkan penggunaan metode YOLO-NAS (You Only Look Once - Neural Architecture Search) yang diimplementasikan pada platform Smart Camera untuk sistem deteksi penggunaan APD yang akurat dan responsif. YOLO-NAS, sebagai pengembangan terkini dalam keluarga algoritma YOLO, dirancang menggunakan teknik Neural Architecture Search yang secara otomatis mengoptimalkan arsitektur jaringan saraf untuk tugas spesifik, berpotensi menghasilkan model dengan keseimbangan superior antara akurasi deteksi yang tinggi, kecepatan pemrosesan real-time, dan efisiensi komputasional.¹⁹ Keunggulan ini sangat krusial untuk aplikasi K3 di lingkungan kerja yang dinamis dan menuntut respons cepat. Implementasi YOLO-NAS pada Smart Camera memungkinkan dilakukannya pemrosesan data langsung di perangkat (on-edge processing). Smart Camera yang dilengkapi dengan kemampuan komputasi internal dapat menganalisis data video secara lokal tanpa perlu mengirimkan seluruh data mentah ke server pusat, sehingga secara signifikan mengurangi latensi transmisi data dan meningkatkan responsivitas sistem.²⁰ Pengurangan latensi ini menjadi faktor kritis dalam aplikasi K3, di mana peringatan dini terhadap ketidakpatuhan penggunaan APD dapat menjadi kunci pencegahan kecelakaan. Lebih lanjut, pemrosesan on-edge juga berkontribusi pada pengurangan kebutuhan bandwidth jaringan dan dapat meningkatkan aspek privasi data karena informasi visual sensitif diproses secara lokal. Sinergi antara arsitektur YOLO-NAS yang efisien dan kemampuan on-edge processing pada Smart Camera berpotensi mentransformasi paradigma pengawasan K3 dari yang bersifat reaktif menjadi lebih proaktif dan preventif secara real-time, serta membuka peluang integrasi dengan sistem manajemen K3 yang lebih luas untuk menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan cerdas.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini difokuskan untuk menjawab bagaimana sebuah prototipe sistem smart camera dapat dirancang dan dibangun secara efektif menggunakan metode YOLO-NAS agar mampu melakukan deteksi otomatis dan real-time terhadap penggunaan beberapa jenis Alat Pelindung Diri (APD) esensial (seperti helm keselamatan, rompi keselamatan, dan masker), sekaligus untuk mengkaji dan mengevaluasi seberapa baik performa sistem yang dikembangkan tersebut, khususnya ditinjau dari aspek akurasi dan kecepatan deteksi, ketika dioperasikan dalam kondisi pengujian yang telah ditentukan

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membangun prototipe sistem smart camera yang fungsional untuk melakukan deteksi otomatis dan real-time terhadap penggunaan beberapa jenis Alat Pelindung Diri (APD) esensial dengan mengimplementasikan metode YOLO-NAS
2. Menganalisis dan mengevaluasi performa prototipe sistem smart camera berbasis YOLO-NAS yang telah dibangun, khususnya dalam aspek akurasi dan kecepatan, dalam mendeteksi penggunaan APD pada kondisi pengujian yang telah ditentukan.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil temuan dalam penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai berikut :

1. Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe sistem smart camera fungsional yang mampu melakukan deteksi otomatis dan real-time terhadap penggunaan beberapa jenis Alat Pelindung Diri (APD) esensial melalui implementasi metode YOLO-NAS. Hasil ini memberikan kontribusi konkret berupa solusi teknologi yang berpotensi meningkatkan keselamatan kerja secara signifikan, serta menjadi studi kasus empiris mengenai penerapan efektif algoritma deep learning terkini (YOLO-NAS) untuk otomasi pemantauan kepatuhan K3 di lingkungan kerja.

2. Penelitian ini menyajikan analisis dan evaluasi kuantitatif terhadap performa prototipe sistem smart camera berbasis YOLO-NAS, khususnya dalam aspek akurasi dan kecepatan deteksi APD pada kondisi pengujian yang telah ditentukan. Hasil analisis ini tidak hanya memvalidasi efektivitas metode yang diimplementasikan, tetapi juga mengidentifikasi karakteristik, keunggulan, serta potensi limitasinya dalam domain spesifik deteksi APD, sehingga menyediakan landasan ilmiah yang esensial untuk optimasi, iterasi desain, dan pengembangan sistem serupa di masa depan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek krusial dalam setiap lingkungan kerja. Secara definitif, K3 dapat dipahami sebagai serangkaian upaya dan pemikiran untuk menjamin keutuhan dan kesempurnaan, baik jasmani maupun rohani, tenaga kerja pada khususnya, dan manusia pada umumnya, hasil karya dan budayanya menuju masyarakat adil dan makmur.¹ Definisi lain menyebutkan K3 sebagai sebuah upaya dalam melindungi dari hal-hal yang berbahaya agar semua orang yang berada pada lingkungan kerja selalu dalam keadaan aman dan sehat.² Perlindungan ini mencakup perlindungan karyawan dari luka-luka yang disebabkan oleh kecelakaan yang terkait dengan pekerjaan.³ World Health Organization (WHO) memperluas definisi ini sebagai upaya untuk meningkatkan serta memelihara derajat kesehatan fisik, mental, dan sosial setinggi-tingginya bagi pekerja di semua jenis pekerjaan, serta mencegah gangguan kesehatan akibat kondisi kerja dan melindungi pekerja dari risiko akibat faktor yang merugikan kesehatan.²

Tujuan utama penerapan K3 di tempat kerja sangatlah luas dan fundamental. Berdasarkan Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, tujuan K3 meliputi upaya untuk 3:

1. Mencegah dan mengurangi kecelakaan kerja.
2. Mencegah, mengurangi, dan memadamkan kebakaran.
3. Mencegah dan mengurangi bahaya peledakan.
4. Memberi jalur evakuasi saat kondisi darurat.
5. Memberikan pertolongan pertama pada kecelakaan.
6. Menyediakan Alat Pelindung Diri (APD) bagi pekerja.
7. Mencegah dan mengendalikan paparan bahaya lingkungan kerja (suhu, kelembaban, debu, asap, gas, kebisingan, getaran, radiasi).
8. Mencegah dan mengendalikan timbulnya penyakit akibat kerja (PAK), baik fisik maupun psikis.
9. Menjamin penerangan, suhu, dan kelembaban udara yang sesuai.

10. Memelihara kebersihan, kesehatan, dan ketertiban.
11. Menciptakan keserasian antara pekerja, alat kerja, dan lingkungan kerja.
12. Mengamankan proses transportasi, penyimpanan, dan bongkar muat.
13. Mencegah bahaya aliran listrik.
14. Menyesuaikan dan menyempurnakan pengamanan pada pekerjaan berbahaya.

Secara lebih ringkas, tujuan K3 juga mencakup pemeliharaan keamanan hasil produksi, penjaminan kesehatan gizi karyawan, peningkatan gairah dan partisipasi kerja, serta pemberian rasa aman kepada pekerja.² Pada intinya, K3 bertujuan melindungi keselamatan pekerja dan orang lain di tempat kerja, menjamin penggunaan sumber produksi secara aman dan efisien, serta meningkatkan kesejahteraan dan produktivitas nasional.² Konveyor adalah sistem mekanis yang digunakan untuk memindahkan barang atau material dari satu lokasi ke lokasi lain dengan cara yang teratur. Konveyor umumnya digunakan dalam industri untuk memfasilitasi transportasi material secara efisien.

2.1.1 Faktor Risiko dan Kecelakaan Kerja

Lingkungan kerja, terutama di sektor-sektor berisiko tinggi seperti konstruksi, manufaktur, dan pertambangan, inherently mengandung berbagai potensi bahaya dan faktor risiko yang dapat menyebabkan kecelakaan kerja.⁴ Industri konstruksi, misalnya, secara konsisten mencatat angka kecelakaan kerja yang tinggi.⁷ Faktor risiko ini dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk peralatan (mesin yang tidak aman, alat rusak), material (bahan kimia berbahaya, benda berat), lingkungan kerja (pencahayaan buruk, kebisingan tinggi, suhu ekstrem, permukaan licin), metode kerja (prosedur tidak aman), dan faktor manusia (human error).⁷

Penyebab kecelakaan kerja bersifat multifaktorial dan jarang disebabkan oleh satu faktor tunggal. Teori-teori klasik seperti Teori Domino Heinrich menjelaskan kecelakaan sebagai rangkaian lima faktor berurutan: lingkungan sosial/kebiasaan, kesalahan manusia, tindakan tidak aman, kecelakaan itu sendiri, dan kerugian/cedera.⁷ Teori ini mengimplikasikan bahwa penghilangan salah satu faktor dapat mencegah kecelakaan. Teori Penyebab Ganda (Multiple

Causation Theory) mengelompokkan penyebab menjadi dua kategori utama: tindakan tidak aman (unsafe act) dan kondisi tidak aman (unsafe condition).⁷ Tindakan tidak aman merujuk pada perilaku pekerja yang menyimpang dari prosedur aman, seperti tidak menggunakan APD, bekerja tergesa-gesa, posisi kerja salah, atau bekerja dalam kondisi tidak sehat (misalnya, kelelahan atau sakit).⁷ Kondisi tidak aman mencakup bahaya fisik di lingkungan kerja, seperti peralatan yang rusak, material berbahaya, atau lingkungan yang tidak memadai.⁷ Organisasi Perburuhan Internasional (ILO) juga mengklasifikasikan penyebab kecelakaan kerja menjadi tiga faktor utama: peralatan teknis, faktor manusia (kurang pengetahuan, tidak patuh prosedur), dan lingkungan kerja.⁷ Pemahaman bahwa kecelakaan disebabkan oleh interaksi berbagai faktor ini menegaskan bahwa upaya pencegahan harus bersifat komprehensif, tidak hanya fokus pada satu aspek seperti perilaku pekerja, tetapi juga mencakup perbaikan kondisi kerja, peralatan, dan sistem manajemen K3 secara keseluruhan.

Klasifikasi kecelakaan kerja menurut ILO memberikan gambaran tentang jenis insiden yang umum terjadi ⁷:

- Menurut Jenis Kecelakaan: Terjatuh, tertimpa benda, tertumbuk/terbentur, terjepit, gerakan berlebihan, paparan suhu ekstrem, kontak dengan arus listrik, kontak dengan bahan berbahaya/radiasi.
- Menurut Penyebab: Mesin, alat angkut, peralatan lain, bahan/zat/radiasi, lingkungan kerja.
- Menurut Sifat Luka/Kelainan: Patah tulang, dislokasi/keseleo, memar, luka permukaan, amputasi, luka bakar, keracunan, efek radiasi, gegar/remuk.
- Menurut Letak Kelainan: Kepala, leher, badan, anggota gerak atas, anggota gerak bawah, beberapa lokasi.

Dampak kecelakaan kerja sangat merugikan, baik bagi pekerja maupun perusahaan. Bagi pekerja, dampaknya bisa berupa cedera fisik ringan hingga berat, cacat permanen, penyakit akibat kerja, trauma psikologis (stres, kecemasan) ¹⁴, bahkan kematian.⁷ Hal ini seringkali diikuti dengan kehilangan kemampuan bekerja dan penurunan pendapatan, yang berdampak pada kondisi ekonomi pekerja dan keluarganya.¹³ Bagi perusahaan, dampaknya meliputi biaya langsung (pengobatan, kompensasi, perbaikan alat) dan biaya tidak

langsung yang seringkali jauh lebih besar (kehilangan waktu produksi, penurunan produktivitas, biaya rekrutmen dan pelatihan pengganti, kerusakan properti, gangguan operasional, potensi denda/sanksi hukum, serta kerusakan reputasi perusahaan).¹ Kerugian akibat kecelakaan kerja dapat memberikan tekanan finansial yang signifikan dan mengganggu kelancaran bisnis.

2.1.2 Upaya Pencegahan Kecelakaan Kerja (Hierarki Pengendalian Risiko)

Pendekatan standar dan paling efektif dalam mengelola risiko di tempat kerja adalah melalui penerapan Hierarki Pengendalian Risiko (Hierarchy of Controls).¹⁹ Konsep ini memprioritaskan tindakan pengendalian dari yang paling efektif dan protektif hingga yang paling kurang efektif. Terdapat lima tingkatan dalam hierarki ini, yaitu:

- a. Eliminasi (Elimination): Menghilangkan sumber bahaya secara fisik dari tempat kerja. Ini adalah metode pengendalian yang paling efektif karena menghilangkan risiko sepenuhnya.²¹ Contohnya adalah menghentikan penggunaan bahan kimia berbahaya atau mendesain ulang proses kerja untuk menghilangkan tugas yang berisiko.
- b. Substitusi (Substitution): Mengganti proses, material, atau peralatan yang berbahaya dengan alternatif yang lebih aman atau kurang berbahaya.²¹ Contohnya adalah mengganti cat berbasis pelarut dengan cat berbasis air atau menggunakan bahan pembersih yang kurang toksik.
- c. Rekayasa Teknik (Engineering Controls): Mengisolasi pekerja dari bahaya atau memodifikasi lingkungan kerja atau peralatan untuk mengurangi paparan. Pengendalian ini dirancang untuk menghilangkan atau mengurangi bahaya pada sumbernya, sebelum pekerja terpapar.²¹ Contohnya termasuk pemasangan sistem ventilasi untuk menghilangkan kontaminan udara, penggunaan pelindung mesin (machine guarding), atau pemasangan peredam suara.
- d. Pengendalian Administratif (Administrative Controls): Mengubah cara orang bekerja melalui prosedur, kebijakan, pelatihan, dan rambu-rambu peringatan.²¹ Pengendalian ini tidak menghilangkan bahaya tetapi membatasi atau mencegah paparan pekerja. Contohnya meliputi penjadwalan rotasi kerja untuk mengurangi waktu paparan, pelatihan

prosedur kerja aman, pemasangan rambu K3, dan inspeksi keselamatan rutin.

- e. Alat Pelindung Diri (APD / PPE): Menyediakan peralatan pelindung bagi pekerja untuk dipakai sebagai penghalang antara pekerja dan bahaya.¹ APD dianggap sebagai garis pertahanan terakhir (last line of defense).²²

Penting untuk dipahami bahwa APD berada di tingkat terendah dalam hierarki karena tidak menghilangkan bahaya itu sendiri dan efektivitasnya sangat bergantung pada penggunaan yang benar dan konsisten oleh pekerja. APD seharusnya hanya digunakan setelah semua upaya pengendalian pada tingkat yang lebih tinggi (eliminasi, substitusi, rekayasa, administratif) telah diimplementasikan namun risiko residual masih ada, atau ketika pengendalian lain tidak memungkinkan secara teknis atau praktis.²³ Ketergantungan berlebihan pada APD tanpa mengatasi akar penyebab bahaya bukanlah praktik K3 yang ideal dan efektif.²⁷ Penelitian ini, yang berfokus pada deteksi penggunaan APD, secara inheren menargetkan tingkat pengendalian terakhir ini. Meskipun pemantauan kepatuhan APD sangat penting untuk memastikan garis pertahanan terakhir ini berfungsi, hal ini harus dilihat sebagai bagian dari strategi K3 yang lebih luas yang juga berupaya menerapkan pengendalian pada tingkat yang lebih tinggi dalam hierarki. Sistem deteksi APD otomatis dapat meningkatkan efektivitas pemantauan pada tingkat ini, namun tidak menggantikan pentingnya upaya eliminasi, substitusi, rekayasa, dan kontrol administratif.

2.2 Alat Pelindung Diri (APD) / Personal Protective Equipment (PPE)

2.2.1 Definisi dan fungsi APD

Konveyor rol (roller conveyor) adalah jenis konveyor yang menggunakan silinder atau rol sebagai medium utama untuk membawa barang atau material dari satu titik ke titik lain. Rol-rol ini biasanya dipasang secara paralel dan membentuk lintasan horizontal atau miring untuk memfasilitasi pergerakan material. Prinsip kerja konveyor rol meliputi :

- Material ditempatkan di atas rol-rol konveyor.
- Rol-rol berputar saat material bergerak melintasi lintasan konveyor.

- Berdasarkan desainnya, konveyor rol dapat digunakan untuk mengangkat material secara gravitasi atau dengan bantuan sistem penggerak.
- Konveyor rol sering digunakan untuk mengangkat barang dalam kontainer, kotak, atau palet.

2.2.2 Konveyor Geser

Alat Pelindung Diri (APD) didefinisikan sebagai seperangkat alat yang digunakan oleh tenaga kerja dengan tujuan melindungi seluruh atau sebagian tubuhnya terhadap kemungkinan adanya potensi bahaya atau kecelakaan kerja di lingkungan kerja.²⁶ Fungsi utama APD adalah untuk mengisolasi pemakainya dari potensi bahaya, sehingga dapat mencegah atau mengurangi risiko cedera dan penyakit akibat kerja.³⁰

Meskipun APD tidak dapat menghilangkan sumber bahaya itu sendiri dan tidak memberikan perlindungan yang sempurna, penggunaannya sangat penting sebagai lapisan pertahanan terakhir.²⁴ Fungsi APD lebih kepada mengurangi tingkat keparahan konsekuensi jika terjadi kontak dengan bahaya atau jika terjadi kecelakaan.²⁹ Penggunaan APD yang tepat dan sesuai dengan jenis bahaya yang dihadapi dapat secara signifikan menurunkan risiko cedera serius dan berkontribusi pada peningkatan keselamatan kerja secara keseluruhan.³²

Pentingnya APD juga tercermin dalam aspek regulasi dan budaya keselamatan. Penyediaan APD yang sesuai merupakan kewajiban hukum bagi pengusaha untuk melindungi pekerjanya, dan APD tersebut harus diberikan secara cuma-cuma.²⁶ Di sisi lain, pekerja juga memiliki kewajiban untuk menggunakan APD yang telah disediakan.³⁰ Kepatuhan dalam penggunaan APD menjadi kunci efektivitasnya.³⁵ Selain itu, komitmen perusahaan dalam menyediakan dan memastikan penggunaan APD yang layak mencerminkan budaya keselamatan yang positif dan kepedulian terhadap

2.2.3 Jenis - Jenis APD

Terdapat berbagai jenis APD yang dirancang untuk melindungi bagian tubuh yang berbeda dari jenis bahaya yang spesifik. Pemilihan jenis APD yang tepat sangat bergantung pada hasil identifikasi bahaya dan penilaian risiko di tempat kerja.²⁶ Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi No.

PER.08/MEN/VII/2010 mengklasifikasikan APD ke dalam beberapa kategori utama 30:

- a. Pelindung Kepala
- b. Pelindung Mata dan Muka
- c. Pelindung Telinga
- d. Pelindung Pernapasan
- e. Pelindung Tangan
- f. Pelindung Kaki
- g. Pakaian Pelindung
- h. Alat Pelindung Jatuh Perorangan
- i. Pelampung

Dalam konteks penelitian ini yang berfokus pada deteksi APD umum di lingkungan kerja industri atau konstruksi, beberapa jenis APD yang paling relevan adalah:

1. Helm Keselamatan (Safety Helmet): Berfungsi utama melindungi kepala dari benturan akibat benda jatuh, terbentur benda keras, serta melindungi dari paparan panas, percikan api, atau sengatan listrik tegangan rendah.³² Helm merupakan APD krusial di area konstruksi, pertambangan, dan industri berat lainnya.³²
2. Rompi Keselamatan (Safety Vest): Termasuk dalam kategori pakaian pelindung, rompi keselamatan dirancang untuk meningkatkan visibilitas (daya terlihat) pekerja, terutama di area dengan lalu lintas alat berat, kendaraan, atau dalam kondisi pencahayaan rendah.³⁹ Biasanya berwarna cerah (misalnya oranye atau hijau stabilo) dan dilengkapi dengan strip reflektif.³⁹
3. Masker/Pelindung Pernapasan (Mask/Respirator): Melindungi sistem pernapasan dari menghirup kontaminan berbahaya di udara seperti debu, asap, uap kimia, gas beracun, atau partikel biologis.²³ Jenisnya bervariasi mulai dari masker debu sederhana hingga respirator dengan filter khusus atau pasokan udara terpisah, tergantung pada jenis dan konsentrasi kontaminan.³⁷

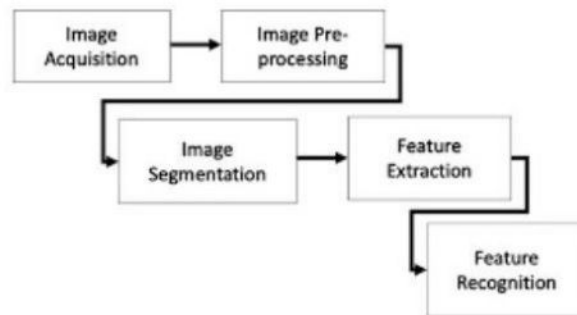
4. Kacamata Pelindung (Safety Glasses/Goggles): Melindungi mata dari berbagai bahaya seperti partikel beterbangan (serpihan logam, kayu, debu), percikan cairan kimia, radiasi (misalnya saat mengelas), atau benturan.²³ Safety glasses mirip kacamata biasa, sedangkan goggles menempel lebih rapat ke wajah untuk perlindungan dari percikan atau uap.⁴⁰
5. Sarung Tangan Keselamatan (Safety Gloves): Melindungi tangan dan jari dari berbagai risiko seperti luka sayat, tertusuk benda tajam, terbakar akibat panas atau api, kontak dengan bahan kimia korosif atau iritan, sengatan listrik, atau getaran berlebih.²³ Terdapat banyak jenis sarung tangan yang terbuat dari material berbeda (logam, kulit, kanvas, karet, nitril, kevlar, dll.) sesuai dengan fungsi perlindungan spesifiknya.³⁰
6. Sepatu Keselamatan (Safety Shoes): Melindungi kaki dari bahaya tertimpa benda berat (biasanya dengan pelindung jari kaki dari baja atau komposit), tertusuk benda tajam dari bawah (dengan sol anti-penetrasi), tergelincir (dengan sol anti-slip), paparan bahan kimia, atau bahaya listrik.²³

Keberagaman jenis APD ini menggarisbawahi pentingnya melakukan penilaian risiko yang cermat untuk menentukan APD yang paling sesuai untuk setiap tugas dan area kerja. Menggunakan jenis APD yang salah tidak akan memberikan perlindungan yang memadai dan dapat menciptakan rasa aman yang palsu. Oleh karena itu, sistem deteksi APD yang ideal tidak hanya mendeteksi keberadaan APD, tetapi juga mampu mengidentifikasi apakah jenis APD yang digunakan sudah tepat sesuai dengan persyaratan keselamatan untuk area atau pekerjaan tersebut.

2.3 Computer Vision

Visi Komputer (Computer Vision) adalah cabang ilmu komputer dan kecerdasan buatan (AI) yang bertujuan untuk memungkinkan mesin (komputer) "melihat", menafsirkan, dan memahami dunia visual di sekitarnya melalui analisis data gambar dan video.⁷² Inti dari visi komputer adalah mereplikasi kemampuan perseptual sistem visual manusia ke dalam sistem artifisial, sehingga komputer dapat mengekstrak informasi bermakna dari input visual.⁷⁴ Bidang ini mengintegrasikan teknik dari pengolahan citra (image processing),

pengenalan pola (pattern recognition), dan machine learning, khususnya deep learning.



Gambar 2.1 computer vision pipeline diagram

Secara umum, sistem visi komputer bekerja melalui serangkaian tahapan

:

- a. Akuisisi Citra: Menangkap data visual (gambar diam atau frame video) menggunakan sensor seperti kamera digital atau pemindai.
- b. Pra-pemrosesan (Preprocessing): Meningkatkan kualitas citra atau mempersiapkannya untuk analisis lebih lanjut, misalnya dengan menghilangkan noise, menyesuaikan kontras, atau melakukan segmentasi awal.
- c. Ekstraksi Fitur (Feature Extraction): Mengidentifikasi dan mengekstrak karakteristik penting atau pola informatif dari citra. Pada metode tradisional, fitur ini dirancang secara manual (hand-crafted), sedangkan pada pendekatan deep learning (terutama CNN), fitur dipelajari secara otomatis oleh model dari data.
- d. Deteksi/Segmentasi/Klasifikasi: Menerapkan algoritma untuk melakukan tugas spesifik berdasarkan fitur yang diekstraksi, seperti mendeteksi lokasi objek, memisahkan objek dari latar belakang, atau mengklasifikasikan seluruh gambar atau objek di dalamnya.
- e. Pengambilan Keputusan/Interpretasi Tingkat Tinggi: Menganalisis hasil dari langkah sebelumnya untuk membuat keputusan, menghasilkan deskripsi, atau memicu tindakan tertentu berdasarkan pemahaman konten visual.

Komputer "melihat" dunia dalam bentuk data numerik (piksel), dan algoritma visi komputer dirancang untuk memproses data piksel ini guna mengenali pola, objek, dan adegan.

2.4 Objek Detection

Deteksi objek merupakan salah satu tugas fundamental dan penting dalam bidang visi komputer. Berbeda dengan klasifikasi gambar yang hanya memberi label pada seluruh gambar, atau segmentasi yang mengklasifikasikan setiap piksel, deteksi objek bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan, lokasi, dan jenis (kelas) dari satu atau lebih objek di dalam sebuah gambar atau video.⁷² Lokasi objek biasanya direpresentasikan menggunakan bounding box, yaitu sebuah kotak persegi panjang yang melingkupi objek yang terdeteksi.⁷² Dengan kata lain, deteksi objek menjawab pertanyaan "Objek apa saja yang ada di dalam gambar ini?" dan "Di mana posisi masing-masing objek tersebut?".

Tugas ini menjadi kompleks karena objek dapat muncul dalam berbagai kondisi, termasuk variasi skala (ukuran objek), sudut pandang, iluminasi (pencahayaan), deformasi (perubahan bentuk), oklusi (sebagian objek tertutup oleh objek lain), dan latar belakang yang ramai atau mirip dengan objek (clutter).⁷⁹ Model deteksi objek yang baik harus mampu mengatasi variasi ini dan secara akurat mendeteksi serta melokalisasi objek yang diminati.

2.5 Metode YOLO (You Only Look Once) dan YOLO-NAS

YOLO (You Only Look Once) merupakan keluarga algoritma deteksi objek yang merevolusi bidang ini dengan pendekatan single-shot detector yang sangat efisien.⁹⁸ Berbeda dengan metode dua tahap seperti Faster R-CNN yang memerlukan region proposal network terpisah, YOLO meringkas deteksi objek sebagai masalah regresi, memprediksi koordinat bounding box dan probabilitas kelas secara langsung dari piksel gambar dalam satu evaluasi jaringan tunggal.⁹⁸

Prinsip kerja dasar YOLO adalah sebagai berikut ⁹⁸:

Pembagian Grid: Gambar input dibagi menjadi grid berukuran $S \times S$.

Prediksi per Sel: Setiap sel grid bertanggung jawab untuk mendeteksi objek jika pusat (centroid) objek tersebut jatuh di dalam sel grid tersebut.

Prediksi Bounding Box dan Confidence: Setiap sel grid memprediksi B bounding box beserta skor kepercayaannya (confidence score). Confidence score ini mencerminkan seberapa yakin model bahwa kotak tersebut berisi objek dan seberapa akurat prediksi kotak tersebut (diukur dengan IoU antara kotak prediksi

dan ground truth). Skor kepercayaan didefinisikan sebagai $\text{Pr}(\text{Object}) \times \text{IoUpredtruth}$. Jika tidak ada objek dalam sel, skor kepercayaan harus nol.

Prediksi Probabilitas Kelas: Setiap sel grid juga memprediksi C probabilitas kelas kondisional, $\text{Pr}(\text{Classi}|\text{Object})$. Ini adalah probabilitas bahwa objek yang terdeteksi termasuk dalam kelas ke-i, dengan asumsi ada objek di dalam sel tersebut. Penting dicatat bahwa hanya satu set probabilitas kelas yang diprediksi per sel grid, terlepas dari jumlah kotak B yang diprediksi.

Skor Kelas Spesifik: Untuk mendapatkan skor kepercayaan kelas spesifik untuk setiap bounding box, probabilitas kelas kondisional dikalikan dengan skor kepercayaan bounding box individual: $\text{Pr}(\text{Classi}|\text{Object}) \times \text{Pr}(\text{Object}) \times \text{IoUpredtruth} = \text{Pr}(\text{Classi}) \times \text{IoUpredtruth}$.

Non-Max Suppression (NMS): Setelah prediksi dibuat, NMS digunakan untuk menghilangkan bounding box yang tumpang tindih dan memiliki skor kepercayaan lebih rendah untuk objek yang sama, sehingga menghasilkan deteksi akhir yang lebih bersih.

Sejak diperkenalkan pertama kali oleh Joseph Redmon dkk. pada tahun 2015, keluarga YOLO telah mengalami evolusi signifikan melalui beberapa versi, masing-masing membawa perbaikan dalam hal akurasi, kecepatan, dan kemampuan [11]:

YOLOv1 (2015): Versi awal yang memperkenalkan konsep deteksi single-shot.[11] Menggunakan arsitektur CNN yang terinspirasi oleh GoogLeNet.[129] Sangat cepat tetapi memiliki keterbatasan dalam mendeteksi objek kecil, objek yang berdekatan, dan objek dengan rasio aspek yang tidak biasa karena setiap sel grid hanya memprediksi dua bounding box dan satu kelas.[100]

YOLOv2 / YOLO9000 (2016): Memperkenalkan beberapa peningkatan kunci: batch normalization pada semua lapisan konvolusi, penggunaan anchor boxes (kotak prior dengan bentuk dan ukuran yang telah ditentukan) untuk memprediksi bounding box (memudahkan pembelajaran dan meningkatkan recall), penggunaan classifier resolusi tinggi, dan backbone baru bernama Darknet-19.[96] YOLO9000 juga mampu mendeteksi lebih dari 9000 kategori

objek secara bersamaan menggunakan mekanisme klasifikasi hierarkis.⁹⁶ YOLOv2 lebih akurat dan lebih cepat dari YOLOv1.¹²⁹

YOLOv3 (2018): Fokus pada peningkatan akurasi lebih lanjut, terutama untuk objek kecil.¹¹¹ Menggunakan backbone yang lebih dalam (Darknet-53), memperkenalkan prediksi pada tiga skala resolusi yang berbeda (mirip Feature Pyramid Network) untuk menangani objek dengan berbagai ukuran, dan menggunakan loss function yang lebih baik (misalnya, binary cross-entropy untuk klasifikasi kelas independen daripada softmax).⁹⁶

YOLOv4 (2020): Dikembangkan oleh Alexey Bochkovskiy dkk.⁹⁸ Mengintegrasikan berbagai teknik optimasi yang disebut "Bag of Freebies" (peningkatan pelatihan tanpa menambah biaya inferensi, contoh: augmentasi data, regularisasi) dan "Bag of Specials" (modul plugin dan metode pasca-pemrosesan yang sedikit menambah biaya inferensi tetapi meningkatkan akurasi, contoh: SPP, PANet, Mish activation) ke dalam arsitektur YOLOv3. Menggunakan backbone CSPDarknet53. Bertujuan mencapai keseimbangan optimal antara kecepatan dan akurasi untuk pelatihan pada satu GPU.⁹⁸

YOLOv5 (2020): Dirilis oleh Ultralytics.¹³⁰ Ditulis dalam PyTorch (berbeda dari versi sebelumnya yang menggunakan Darknet C framework), membuatnya lebih mudah digunakan dan dimodifikasi. Menawarkan berbagai ukuran model (n, s, m, l, x) untuk trade-off kecepatan-akurasi yang berbeda. Sangat cepat, ukuran model relatif kecil, dan populer di kalangan praktisi.¹³¹

Versi Selanjutnya (YOLOv6, YOLOv7, YOLOv8, dll.): Pengembangan YOLO terus berlanjut oleh berbagai kelompok peneliti. YOLOv7 (2022) memperkenalkan teknik seperti "trainable bag-of-freebies" dan re-parameterisasi model.¹³² YOLOv8 (2023, oleh Ultralytics) mengadopsi desain anchor-free, backbone dan neck baru, serta mendukung tugas-tugas di luar deteksi objek (segmentasi, klasifikasi, pose).

2.6 Camera Webcam

Webcam merupakan kamera digital berukuran ringkas yang terkoneksi dengan komputer atau gawai lainnya untuk merekam gambar dan video secara langsung. Perangkat ini lazim dimanfaatkan untuk komunikasi video seperti panggilan dan konferensi daring, siaran langsung (streaming), hingga teknologi

pengenalan wajah. Webcam tersedia dalam model eksternal yang tersambung via USB maupun model internal yang terintegrasi pada laptop atau perangkat sejenis. Cara kerjanya adalah dengan menangkap visual melalui sensor, lalu mengonversinya menjadi data digital yang dapat diolah oleh perangkat lunak untuk beragam aplikasi.



Gambar 2.2 Webcam

2.7 Penelitian Terdahulu

Berikut merupakan state of the art dari peneliti sebelumnya

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Author Dan Tahun	Judul	Arsitektur model	Performansi model	Akurasi Model
(Natalia & Asmunin, 2023)	Deteksi Kelengkapan APD Keselamatan Pekerja Konstruksi Dengan Menggunakan Metode <i>Convolutional Neural Network</i> Dan Model Jaringan YOLOv5	(<i>Convolutional Neural Network</i>) <i>CNN</i>	Perbandingan matrik: <i>Precision, Recall, mAP, dan F1-Score</i>	90.75%
(Teramoto et al., 2023)	Klasifikasi Otomatis Sel Urin Menggunakan <i>Convolutional Neural Network</i> yang Dilatih Sebelumnya pada Sel Paru	<i>CNN</i>	Perbandingan matrik: <i>Sensitivity, Specificity, Precision, Accuracy, dan F1-Score</i>	87.60%
(Hadi Supriyanto et al., 2024)	Deteksi Helm Keselamatan Menggunakan Jetson	<i>CNN</i>	Perbandingan matrik: <i>Accuracy,</i>	97,19%

Author Dan Tahun	Judul	Arsitektur model	Performansi model	Akurasi Model
	Nano dan YOLOv7 Hadi		<i>Precision, dan Recall</i>	
(Özüağ & Ertuğrul, 2024)	Peningkatan Keselamatan Kerja di Pabrik Mesin Pertanian Deteksi Helm Berbasis Kecerdasan Buatan Menggunakan Transfer Learning dan Pemungutan Suara Mayoritas	<i>CNN</i>	Perbandingan matrik: <i>Accuracy, Balanced accuracy, dan mAP</i>	90,49%
(Klasifikasi et al., 2025)	Penerapan Klasifikasi Citra Pada Identifikasi Objek dengan Pakaian Safety Menggunakan Convolutional Neural Network Di PT Jayatama Safetindo	<i>CNN</i>	Perbandingan matrik: <i>Accuracy, Precision, Recall, F1-Score</i>	96.00%

Sumber: Hasil penelitian sebelumnya diolah (2022)

2.8 Kerangka Konsep Penelitian

Kerangka berpikir penelitian ini menggambarkan alur logis dari identifikasi masalah hingga solusi yang diusulkan dan hasil yang diharapkan. Penelitian ini didasari oleh permasalahan rendahnya tingkat kepatuhan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) di berbagai lingkungan kerja, yang berkontribusi signifikan terhadap tingginya angka kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Pemantauan kepatuhan APD secara manual oleh petugas K3 memiliki banyak keterbatasan, seperti subjektivitas, inkonsistensi, keterbatasan cakupan area dan waktu, serta membutuhkan sumber daya manusia yang intensif, sehingga seringkali tidak efektif.

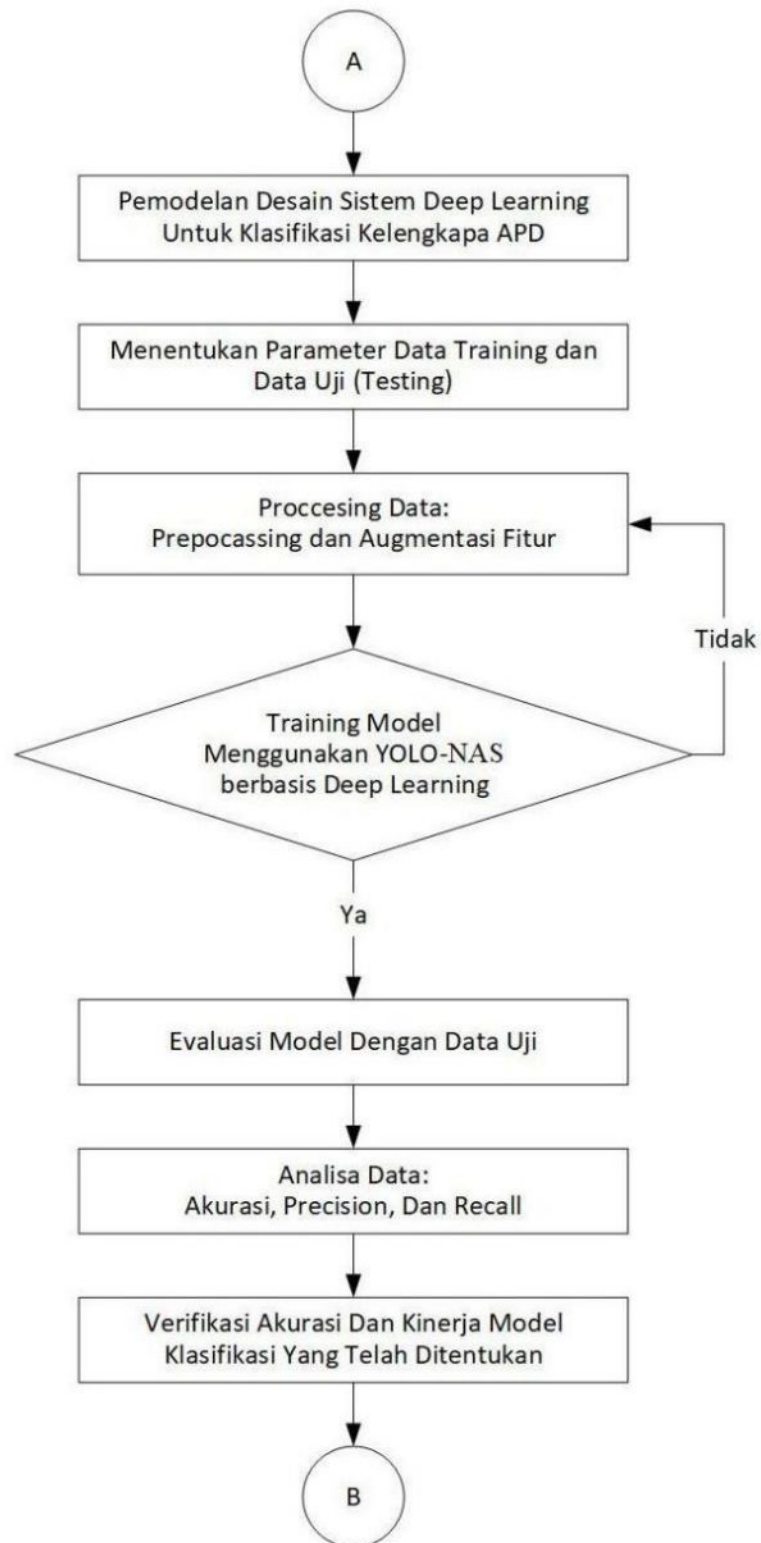
BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

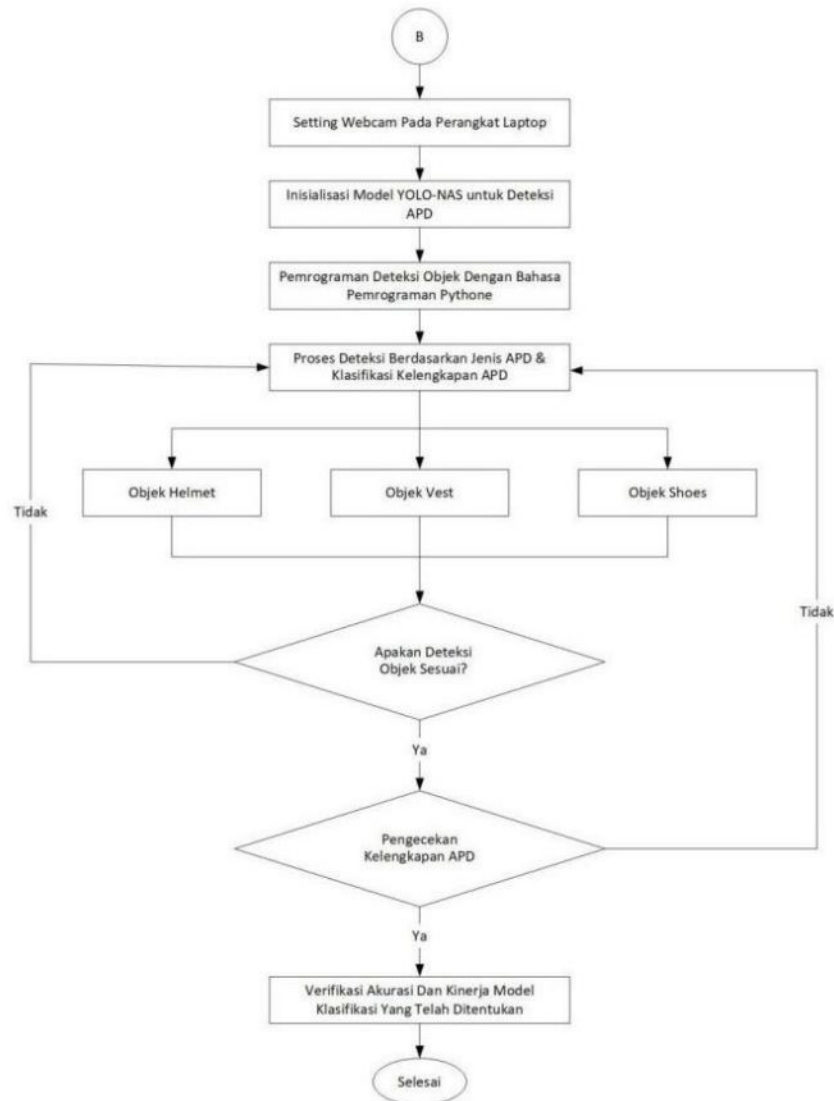
Langkah – langkah penelitian yang dilakukan pada pelaksanaan penelitian ini mengikuti Flowchart yang ditunjukkan oleh gambar III.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1. Rencana Tahapan Penelitian



Gambar 3.2. Flowchart Konsep Desain Dan Perancangan Sistem



Gambar 3.3. Flowchart Konsep Desain Dan Perancangan Sistem

Tahap Awal dan Persiapan Sistem (Gambar 3.1): Penelitian diawali dengan peletakan fondasi konseptual yang meliputi perumusan masalah, penetapan tujuan, penentuan batasan masalah, serta identifikasi manfaat yang diharapkan. Langkah ini krusial untuk mengarahkan fokus dan ruang lingkup penelitian. Selanjutnya, dilakukan analisis kebutuhan sistem klasifikasi kelengkapan APD yang berbasis *deep learning*, yang bertujuan untuk memilih metode dan pendekatan paling sesuai. Tahap berikutnya berfokus pada akuisisi dan preparasi dataset APD, yang terdiri dari citra helm, rompi, dan sepatu, sebagai bahan baku untuk melatih model. Setelah dataset siap, arsitektur *deep*

learning YOLO-NAS dipilih dan diterapkan untuk tugas klasifikasi. Sebagai penutup tahap persiapan ini, dirancang sistem *webcam* yang akan berfungsi sebagai perangkat input untuk menangkap data secara *real-time* guna keperluan deteksi APD. Output dari keseluruhan proses awal ini adalah sebuah sistem yang telah siap untuk memasuki fase pemodelan, pelatihan, dan evaluasi, yang ditandai sebagai titik A.

Proses Pemodelan, Pelatihan, dan Evaluasi Model (Gambar 3.7):

Berlanjut dari tahap persiapan, proses teknis berikutnya adalah pemodelan sistem *deep learning* yang dirancang khusus untuk klasifikasi kelengkapan APD. Peneliti kemudian menetapkan parameter untuk data latih (*training*) dan data uji (*testing*), termasuk strategi pembagian dataset beserta rasio yang digunakan. Untuk mengoptimalkan data sebelum proses pelatihan, dilakukan tahap pra-pemrosesan dan augmentasi fitur. Apabila data telah dinilai representatif dan optimal, model YOLO-NAS berbasis *deep learning* kemudian dilatih. Pasca pelatihan, performa model diuji menggunakan data uji yang telah disiapkan, diikuti dengan evaluasi mendalam berdasarkan metrik standar seperti akurasi, presisi (*precision*), dan perolehan (*recall*). Langkah terakhir pada fase ini adalah verifikasi terhadap akurasi dan kinerja keseluruhan model klasifikasi sebelum diimplementasikan. Hasil akhir dari tahap ini adalah sebuah model yang telah teruji dan siap diintegrasikan ke dalam sistem deteksi berbasis *webcam*, ditandai sebagai titik B.

Implementasi Sistem dan Validasi Akhir (Gambar 3.8): Tahap implementasi nyata sistem dimulai dengan konfigurasi *webcam* pada perangkat laptop yang berfungsi sebagai sumber input video. Model YOLO-NAS yang telah dilatih kemudian diinisialisasi dengan nilai-nilai yang diperlukan untuk melakukan deteksi APD. Selanjutnya, dilakukan pengembangan perangkat lunak menggunakan bahasa pemrograman Python untuk mengintegrasikan fungsi kamera dengan model klasifikasi sehingga mampu melakukan deteksi objek. Sistem akan bekerja dengan mendeteksi jenis APD spesifik: helm, rompi (*vest*), dan sepatu. Jika sebuah objek terdeteksi, sistem akan memverifikasi kesesuaian deteksi tersebut; jika tidak sesuai, proses akan kembali ke awal, namun jika sesuai, sistem akan melanjutkan ke pengecekan kelengkapan APD secara

keseluruhan, yaitu memastikan ketiga item (helm, rompi, sepatu) dikenakan oleh individu. Setelah proses pengecekan kelengkapan tuntas, dilakukan verifikasi final terhadap akurasi dan kinerja model dalam skenario penggunaan nyata. Tahapan ini diakhiri dengan selesainya proses klasifikasi dan validasi sistem secara menyeluruh.

Secara keseluruhan, rangkaian diagram tersebut secara lengkap memvisualisasikan alur pengembangan sistem, mulai dari perancangan konseptual, proses teknis pemodelan dan pelatihan, hingga implementasi praktis dan evaluasi akhir. Penelitian ini secara spesifik memanfaatkan keunggulan YOLO-NAS untuk meningkatkan akurasi dalam pendeteksian APD, serta mengintegrasikan sistem dengan *webcam* untuk memungkinkan penggunaan secara *real-time*, yang pada akhirnya bertujuan untuk mendukung dan memperkuat penerapan standar keselamatan kerja di lapangan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Konsep Sistem

Sistem yang dikembangkan berfungsi sebagai *intelligent quality control* dengan kemampuan mendeteksi keberadaan APD pada pekerja secara real-time. Proses dimulai dari input citra melalui webcam, kemudian citra tersebut diproses menggunakan pustaka OpenCV. Model YOLO-NAS selanjutnya mengidentifikasi keberadaan tiga jenis APD utama, yaitu helm, rompi, dan sepatu safety. Hasil deteksi ditampilkan dalam bentuk *bounding box* yang dilengkapi label kelas serta nilai probabilitas.

Pendekatan ini dipilih karena YOLO-NAS memiliki arsitektur yang lebih optimal dibanding generasi sebelumnya. Model mampu mengekstraksi fitur visual secara efektif dan efisien, sehingga sesuai untuk aplikasi deteksi APD dalam lingkungan industri yang menuntut kecepatan dan akurasi tinggi.

4.2 Pre-Processing Data

Proses *pre-processing* dilakukan menggunakan bantuan platform Roboflow. Dataset yang digunakan terdiri dari 2.300 citra pekerja yang dikumpulkan melalui kamera smartphone. Tahap pertama adalah **anotasi data**, di mana setiap citra diberi label sesuai jenis APD: helm, rompi, dan sepatu safety.



Gambar 4.1 Dataset APD

Setelah proses anotasi, data dibagi ke dalam tiga subset: 70% untuk *training* (1.600 gambar), 20% untuk *validation* (435 gambar), dan 10% untuk *testing* (218 gambar). Pembagian ini bertujuan untuk memastikan model dapat belajar dari sebagian besar data, divalidasi saat pelatihan, dan diuji pada data yang belum pernah dilihat sebelumnya.

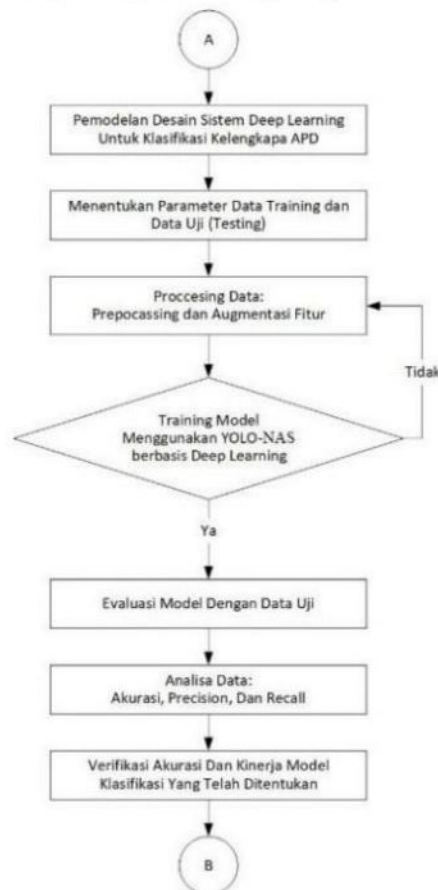
Selanjutnya dilakukan **resize citra** menjadi ukuran 640×640 piksel, agar seragam dengan format input model YOLO-NAS. Selain itu, diterapkan **augmentasi data** berupa rotasi, perubahan pencahayaan, dan transformasi geometri. Teknik augmentasi

ini meningkatkan variasi dataset sehingga model lebih mampu beradaptasi terhadap kondisi nyata di lapangan yang beragam.

4.3 Pelatihan Model

Pelatihan model dilakukan di Google Colab dengan memanfaatkan framework SuperGradients. Parameter pelatihan yang digunakan adalah resolusi input 640×640 , *batch size* 5, optimizer Adam, serta penyesuaian *learning rate* melalui penyetelan *hyperparameter*. Proses pelatihan berlangsung selama 10 *epoch*.

Selama pelatihan, YOLO-NAS bertugas mengekstraksi fitur visual dari citra APD. Fitur tersebut kemudian dipetakan ke dalam tiga kelas target. Grafik hasil pelatihan memperlihatkan tren yang positif: nilai *loss* baik pada data latih maupun validasi mengalami penurunan yang stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa model berhasil menyesuaikan parameter tanpa mengalami *overfitting*.



Gambar 4.2 Alur Pelatihan Data

Tahapan teknis yang dilakukan meliputi pemodelan serta pelatihan model. Proses dimulai dengan merancang arsitektur deep learning untuk klasifikasi kelengkapan APD. Selanjutnya ditentukan parameter data latih dan data uji, termasuk pembagian dataset beserta rasio yang digunakan. Data kemudian melalui tahap preprocessing serta

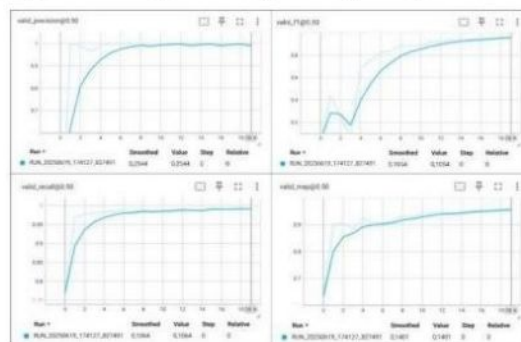
augmentasi agar lebih optimal saat dimasukkan ke dalam model. Setelah data siap, dilakukan pelatihan model menggunakan algoritma YOLO-NAS berbasis deep learning. Model yang telah terlatih kemudian diuji menggunakan data uji, dan hasil deteksi dievaluasi melalui metrik akurasi, precision, serta recall guna menilai performanya. Langkah akhir berupa verifikasi tingkat akurasi dan kinerja model klasifikasi sebelum diterapkan pada implementasi nyata. Keluaran dari tahapan ini adalah model siap pakai untuk sistem deteksi berbasis webcam (ditunjukkan dengan lingkaran B).

4.4 Evaluasi Model

Evaluasi dilakukan menggunakan data *validation* dan *testing* dengan beberapa metrik utama, yaitu precision, recall, F1-score, dan mAP.

- Precision sebesar 98,16% menunjukkan bahwa hampir semua deteksi yang dilakukan model benar, dengan jumlah *false positive* yang sangat kecil.
- Recall sebesar 98,32% membuktikan kemampuan model dalam mendeteksi hampir seluruh objek yang sebenarnya ada, sehingga *false negative* juga rendah.
- F1-Score mencapai 97,21% yang menegaskan keseimbangan performa antara precision dan recall.
- mAP (mean Average Precision) sebesar 96,07% menegaskan bahwa model mampu memberikan prediksi dengan posisi *bounding box* yang akurat pada setiap kelas.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa YOLO-NAS dapat belajar secara efektif dari dataset yang diberikan, serta siap diterapkan pada kondisi nyata.



Gambar 4.3 Training Arsitektur Model

4.5 Implementasi Sistem Berbasis Webcam

Setelah model selesai dilatih, dilakukan pengujian implementasi secara real-time menggunakan webcam. Pengujian ini penting untuk menilai kinerja sistem di lingkungan nyata yang lebih kompleks dibandingkan data uji laboratorium.

Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 2, dengan jumlah percobaan sebanyak 20 kali untuk masing-masing kelas APD. Dari evaluasi tersebut diperoleh nilai:

- Precision total sebesar 96,42%.
- Recall total sebesar 93,10%.
- F1-score total sebesar 94,84%.
- mAP sebesar 94,78%.

Walaupun sedikit menurun dibandingkan hasil evaluasi data latih, performa implementasi tetap tergolong tinggi. Penurunan ini wajar mengingat adanya pengaruh kondisi lingkungan, seperti pencahayaan, sudut pandang kamera, serta pergerakan objek yang dinamis.



Gambar 4.4. Hasil Implementasi Webcam

BAB V

KESIMPULAN

5.1 kesimpulan

Hasil penelitian membuktikan bahwa YOLO-NAS mampu menjadi solusi efektif untuk mendeteksi kelengkapan APD. Pada tahap pelatihan, semua metrik evaluasi berada di atas 95%, menandakan performa sangat baik. Pada tahap implementasi, meskipun akurasi sedikit menurun, nilai F1-score tetap di kisaran 93%.

Perbedaan ini terutama disebabkan oleh perbedaan kondisi pengambilan data. Pada dataset pelatihan, citra lebih terkontrol, sedangkan pada implementasi nyata terdapat faktor variabilitas seperti cahaya, posisi, dan kualitas kamera. Namun demikian, kinerja model masih sangat baik dan dapat diandalkan untuk mendukung keselamatan kerja.

Sistem yang dikembangkan berpotensi diaplikasikan di lingkungan industri sebagai alat bantu pengawasan otomatis untuk memastikan pekerja selalu menggunakan APD. Dengan akurasi di atas 94%, sistem ini dapat menjadi bagian dari upaya pencegahan kecelakaan kerja, sekaligus mendukung penerapan teknologi berbasis kecerdasan buatan dalam bidang keselamatan industri.

5.2 Saran

a. Pengayaan Dataset

Dataset yang digunakan sebaiknya diperluas dengan menambahkan lebih banyak variasi kondisi nyata, seperti pencahayaan berbeda, sudut kamera beragam, serta lingkungan kerja yang kompleks. Hal ini dapat meningkatkan kemampuan model dalam menghadapi situasi nyata di lapangan.

b. Penambahan Jenis APD

Penelitian ini hanya berfokus pada tiga jenis APD (helm, rompi, dan sepatu safety). Untuk penelitian selanjutnya, sistem dapat diperluas dengan mendeteksi jenis APD lain seperti sarung tangan, masker,

atau kacamata pelindung, sehingga deteksi menjadi lebih komprehensif.

c. Optimasi Perangkat Keras

Implementasi sistem berbasis webcam masih terbatas oleh spesifikasi perangkat keras. Penggunaan kamera dengan resolusi lebih tinggi atau perangkat komputasi edge (seperti NVIDIA Jetson atau Google Coral) dapat meningkatkan kecepatan serta akurasi deteksi secara real-time.

d. Integrasi dengan Sistem Industri

Sistem deteksi APD dapat diintegrasikan dengan sistem keamanan industri, misalnya dengan memberikan notifikasi otomatis jika pekerja tidak menggunakan APD. Hal ini akan meningkatkan efektivitas penerapan sistem dalam mendukung keselamatan kerja.

e. Uji Coba Lapangan

Penelitian selanjutnya sebaiknya melakukan uji coba langsung di lingkungan industri dengan jumlah sampel pekerja lebih banyak untuk mengevaluasi keandalan sistem pada kondisi nyata secara lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Anas, A. V., Ramli, M., Purwanto, Ilyas, A., Tui, R. N. S., Amalia, R., & Arjan, A. (2021). Inisiasi Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Kegiatan Pertambangan Material Konstruksi Di PT Harfia Graha Perkasa, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. *JURNAL TEPAT : Teknologi Terapan untuk Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 195-203.
- Juniar, A. T., & Latumahina, R. E. (2025). IDENTIFIKASI PARAMETER KELALAIAN PERUSAHAAN DALAM PELAKSANAAN KESEHATAN DAN KESELAMATAN KERJA PADA PROYEK PEMBANGUNAN MENURUT PERATURAN KETENAGAKERJAAN. *Jurnal Transparansi Hukum*, 8(1), 1-20.
- Maretnowati, R., Azizi, A., & Anjarwati, S. (2020). Analisis Pelaksanaan Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Proyek Pembangunan Gedung K Universitas Muhammadiyah Purwokerto. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(2), 531-538.
- Sulistyaningtyas, N. M. D., Suroga, I. G. A., Kardi, C., & Widana, I. K. (2021). Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kecelakaan Akibat Kerja Pada Pekerja Konstruksi: Literature Review. *Journal of Industrial Hygiene and Occupational Health*, 5(2), 11-24.
- Ariyanto, E. (2023). Hubungan Pengetahuan dan Sikap Terhadap Kepatuhan Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) di PT. Bima Trisakti Kota Banjarmasin. *Media Publikasi Promosi Kesehatan Indonesia (MPPKI)*, 6(4), Article 3411. 8
- Fajri, M. R., & Putra, A. (2024). Implementasi Sistem IoT untuk Deteksi Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) Menggunakan Algoritma YOLOv8. *Jurnal E-Komtek*, 8(1), 1-12. 1919
- Gumelar, F., & Ardyanto, D. (2019). Hubungan Kepatuhan dan Pengetahuan Tentang APD dengan Safety Talk di Unit Maintenance Perusahaan Semen. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*, 1(1), 1-8. 11
- Handayani, L., Suroto, & Wahyuni, I. (2024). Hubungan Karakteristik Individu, Safety Sign, Kondisi APD, dan Pengawasan dengan Penggunaan APD pada Pekerja Depo Lokomotif. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Indonesia*, 19(4), 17-23. 1
- Hidayat, T., & Sari, D. P. (2023). Tantangan dalam Implementasi Penggunaan Alat Pelindung Diri di Perusahaan Logistik Kepelabuhanan. *PREPOTIF: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 8(3), 7977-7984. 1212

- Istigfari, S. N., & Dwiantoro, L. (2022). Kepatuhan Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) pada Petugas Kesehatan: Faktor yang Mempengaruhi. *Journal of Holistic Nursing and Health Science*, 5(2), 112-121. 15
- Maharani, A., & Widyanti, R. (2021). Faktor-Faktor yang Berhubungan dengan Kepatuhan Menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) pada Pekerja Proyek Pembangunan PLTGU. *Jurnal Ilmiah Kesehatan Masyarakat*, 13(3), 141-149. 17
- Pamelia, I., & Martiana, T. (2019). Deskripsi Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Ketidakepatuhan Penggunaan APD di SPBU X Surabaya. *Journal of Industrial Hygiene and Occupational Health*, 4(1), 120-128. 14
- Pratiwi, R. A., dkk. (2024). Efektivitas Pelatihan Keselamatan Kerja di Konstruksi Dan Peran Manajemen dalam Meningkatkan Kepatuhan K3. *Jurnal Ilmiah Ekonomi Manajemen dan Bisnis*, 5(2), 57-66. 6 (Catatan: Penulis disesuaikan dari konten, jurnal teridentifikasi merujuk sumber Sinta/Scopus)
- Rahayu, S. M., Abdullah, A., & Yusuf, M. (2023). Sosialisasi Alat Pelindung Diri (APD) untuk Meningkatkan Keselamatan dan Kesehatan Kerja. *JPKM: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara*, 4(2), 112-119. 7
- Saputri, N. A., Wibawa, A., & Nugroho, H. (2022). Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Rendahnya Kepatuhan Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) pada Pekerja Informal. *PREPOTIF: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 7(1), 100-108. 10
- Situngkir, D., dkk. (2025). Sosialisasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) serta Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) pada Pelatihan Las. *JAHE: Journal of Applied Health Education*, 7(1), 45-52. 9
- Swandaru, G. (2025). Deteksi Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) pada Pekerja Berbasis Web browser Menggunakan YOLOv8 dan TensorFlow.js. *BITCODE: Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*, 3(1), 1-10. 2020
- Taufiqurrochman, M. A., & Februariyanti, H. (2024). Rancang Bangun Aplikasi Deteksi Alat Pelindung Diri (APD) untuk Pekerja Proyek dengan Menggunakan Algoritma Yolov5. *Jurnal JTIK (Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi)*, 8(2), 471-480. 21
- Tim K3. (2018). Analisis Risiko dan Hirarki Pengendalian pada Proyek Konstruksi. *Jurnal Bisnis dan Manajemen*, 10(2), 123-135. 22
- Yuliani, F., & dkk. (2021). Implementasi Manajemen Risiko K3: Studi Kasus Industri Manufaktur. *Jupiter: Jurnal Pendidikan Teknik Elektro dan Informatika*, 6(1), 50-58.

S. K. Rusdiana, N. D. P. B, J. K. Masyarakat, and F. K. Masyarakat, "HUBUNGAN UNSAFE CONDITION DENGAN KECELAKAAN KERJA PADA FOUNDRY DI PT. BARATA INDONESIA (PERSERO) THE RELATIONSHIP BETWEEN UNSAFE CONDITION AND WORK ACCIDENTS AT THE FOUNDRY AT PT. BARATA INDONESIA (PERSERO)," 2025.

P. Bank, O. Nisp, and C. Semarang, "Prestisius Hukum Brilliance Prestisius Hukum Brilliance," *Prestisius Huk. Brill.*, vol. 6, no. 2, pp. 45–58, 2024.

A. Gapur, D. Wahiddin, T. Al Mudzakir, and J. Indra, "PERSONAL PROTCTIVE EQUIPMENT DETECTION FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH USING YOLOV8 IN MANUFACTURING COMPANIES DETEKSI ALAT PELINDUNG DIRI UNTUK KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA MENGGUNAKAN YOLOV8 di PERUSAHAAN MANUFAKTUR," vol. 5, no. 4, pp. 1175–1182,