

PERANCANGAN *SAFETY INTERLOCK SYSTEM* PADA *PRESSURE TEST* MENGGUNAKAN *COMPUTER VISION*

TESIS

Oleh

LUKI SATRIA

NIM: 7312411014

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Terapan Program Studi Teknik Komputer



**PROGRAM STUDI
MAGISTER TERAPAN TEKNIK KOMPUTER
POLITEKNIK NEGERI BATAM
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *SAFETY INTERLOCK SYSTEM* PADA *PRESSURE TEST* MENGGUNAKAN *COMPUTER VISION*

Oleh:

LUKI SATRIA

NIM: 7312411014

Telah diuji dan dipertahankan di depan Tim Penguji
dalam Sidang Akhir Tesis
pada tanggal 27 Juli 2026
dan dinyatakan **LULUS**

Batam, 14 Agustus 2026
Disetujui dan disahkan oleh:
Pembimbing Utama,



Andy Triwinarko, S.T, M.T., Ph.D
NIP. 197910072012121001

ABSTRAK

Pengujian internal pressure merupakan salah satu tahapan kritis dalam proses produksi peralatan industri migas karena melibatkan tekanan tinggi yang berpotensi menimbulkan risiko kecelakaan kerja apabila terjadi kegagalan sistem atau kesalahan operasional. Pada praktiknya, sistem pengamanan yang digunakan masih didominasi oleh safety interlock konvensional yang bergantung pada sensor fisik dan pengawasan operator sehingga memiliki keterbatasan dalam mendeteksi kondisi tidak aman secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan Safety Interlock System berbasis Computer Vision yang mampu meningkatkan tingkat keselamatan pada proses pressure test melalui integrasi teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) dengan sistem interlock industri. Metode penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) yang meliputi studi literatur, perancangan sistem, pengumpulan data citra termal, pre-processing, pelatihan model deep learning, implementasi sistem, serta pengujian dan evaluasi kinerja. Sistem memanfaatkan kamera termal untuk memperoleh citra pengujian, kemudian dilakukan pengolahan citra menggunakan algoritma Convolutional Neural Network (CNN) dan You Only Look Once (YOLO) untuk mendeteksi keberadaan operator, kondisi kebocoran, serta status keamanan area pengujian secara otomatis. Hasil deteksi selanjutnya diintegrasikan dengan sistem interlock sehingga proses pengujian hanya dapat dijalankan apabila seluruh parameter keselamatan telah terpenuhi.

Kata kunci: Safety Interlock System, Computer Vision, Artificial Intelligence, Thermal Camera, Deep Learning, CNN, YOLO, Pressure Test, Keselamatan Kerja.

ABSTRACT

Internal pressure testing is one of the most critical stages in the manufacturing process of oil and gas equipment because it involves high-pressure conditions that pose significant occupational safety risks in the event of system failure or operational errors. In current industrial practice, safety protection is still predominantly based on conventional safety interlock systems that rely on physical sensors and operator supervision, limiting their ability to detect hazardous conditions in real time. This study aims to design and develop a Computer Vision-based Safety Interlock System to improve safety during pressure testing by integrating Artificial Intelligence (AI) with industrial safety interlock systems. The research adopts a Research and Development (R&D) approach, including literature review, system design, thermal image data acquisition, image pre-processing, deep learning model training, system implementation, and performance evaluation. The proposed system utilizes a thermal camera to capture inspection images, which are then processed using Convolutional Neural Network (CNN) and You Only Look Once (YOLO) algorithms to automatically detect operator presence, leakage conditions, and the safety status of the testing area. The detection results are integrated with the industrial safety interlock system, allowing the pressure testing process to proceed only when all predefined safety parameters have been satisfied.

Keywords: *Safety Interlock System, Computer Vision, Artificial Intelligence (AI), Thermal Camera, Deep Learning, Convolutional Neural Network (CNN), You Only Look Once (YOLO), Internal Pressure Testing, Occupational Safety.*

DAFTAR ISI

BAB 1	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Tujuan Penelitian	3
1.4	Manfaat Penelitian	3
1.5	Batasan Masalah	3
1.6	Sistematika Penulisan	4
1.7	Metode Penelitian dan Diagram Alur Penelitian	4
BAB 2	TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1	Pengertian Safety Interlock System	6
2.2	Sistem Kontrol	6
2.3	Penggunaan Artificial Intelegence (AI) Dalam Sistem Vision	6
2.4	Teknologi Computer Vision	7
2.5	Standard Keselamatan Sistem Interlock Industri	7
2.6	Komponen Utama Sistem Perancangan	8
2.7	Studi Smart Manufacturing	8
2.8	Penelitian Sebelumnya	8
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN`	10
3.1	Metode Penyelesaian Masalah	10
3.2	Perancangan Masalah	11
3.3	Implementasi Teknologi	12
3.4	Skenario Pengujian Sistem	15
3.4.1	Tujuan dan Sasaran	15
3.4.2	Skenario Pengujian Computer Vision	15
3.4.3	Skenario Pengujian Thermal Inspection (Deteksi Kebocoran Gas)	16
3.4.4	Skenario Pengujian Logika Safety Interlock PLC	17
3.4.5	Ringkasan Skenario Pengujian	18
3.5	Lingkungan Pengujian (Test Environment)	19
3.6	Metode Pengujian Sistem	20
3.7	Metode Pengumpulan Data	22
3.8	Metode Analisis Hasil dan Pembahasan	23
3.9	Hipotesis Penelitian	24

BAB 4	PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM	25
4.1	Perancangan sistem	25
4.1.1	Konsep Kerja	25
4.1.2	Arsitektur Sistem	26
4.1.3	Block Diagram Sistem	28
4.1.4	Data Flow	28
4.2	Implementasi Hardware	28
4.2.1	Implementasi Programmable Logic Controller (PLC)	29
4.2.2	Implementasi embedded PC	30
4.2.3	Implementasi Surveillance Camera	30
4.2.4	Implementasi Thermal Camera	31
4.2.5	Implementasi Sensor	32
4.2.6	Implementasi Door Lock dan Actuator	32
4.2.7	Implementasi Alarm System	32
4.2.8	Wiring Diagram	33
4.3	Implementasi Computer Vision (YOLO)	33
4.3.1	Persiapan Dasar Sistem	34
4.3.2	OpenCV dan Perbaikan Kompatibilitas NumPy	35
4.3.3	Instalasi PyTorch	36
4.3.4	Instalasi YOLOv5	37
4.3.5	Koneksi Jaringan ke Kamera	38
4.3.6	Konversi Model ke TensorRT	39
4.3.7	Menjalankan Inference (Computer Vision Aktif)	41
4.4	Implementasi Image Processing	45
4.4.1	Implementasi PLC Programming	48
4.4.2	Integrasi Computer Vision–PLC	48
4.4.3	Communication Architecture	49
4.4.4	Surveillance Camera Interface	50
4.4.5	Thermal Inspection Camera Interface	50
4.4.6	PLC Communication Interface	51
4.4.7	Human Machine Interface (LabVIEW)	51
BAB 5	HASIL DAN PEMBAHASAN	53
5.1	Data Hasil Pengujian	53
5.1.1	Pengujian Computer Vision	53

5.1.2	Pengujian PLC dan Data Acquisition	54
5.1.3	Pengujian Keandalan Sistem	55
5.1.4	Pengujian Pengaruh Jarak Kamera	55
5.1.5	Pengujian Pengaruh Besar Kebocoran	55
5.1.6	Pengujian Waktu Respon	57
5.1.7	Pengujian Akurasi Model Computer Vision	58
5.1.8	Pengujian Stabilitas Dan Keandalan Sistem	59
5.1.9	Target Performa	61
5.2	Analisa Sistem	61
5.2.1	Analisa Hasil Pengujian Sistem Menyeluruh	61
5.2.2	Analisis Pengaruh Sudut Kamera terhadap Akurasi Deteksi	62
5.2.3	Analisis Waktu Respon Safety Interlock System	62
5.2.4	Analisis Akurasi Model Computer Vision	63
5.2.5	Analisis Terintegrasi Seluruh Pengujian	63
5.2.6	Hasil Perancangan System	64
5.2.7	Hasil Implementasi Perangkat Lunak	65
5.2.8	Evaluasi Sistem	65
5.3	Pembahasan Hasil Penelitian	66
BAB 6	KESIMPULAN DAN SARAN	68
6.1	Kesimpulan	68
6.2	Saran	69
	Daftar Pustaka	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Interlock	12
Gambar 3.2 Arsitektur Perangkat	13
Gambar 3.3 Arsitektur Sistem AI + Kamera (Edge AI)	14
Gambar 3.4 Tampilan Antar Muka & Sistem Kontrol.....	15
Gambar 3.5 Flowchart Alur Kerja Interlock.....	21
Gambar 4.1 Konsep Kerja Sistem Interlock.....	26
Gambar 4.2 Konsep Kerja Sistem Interlock.....	27
Gambar 4.3 Instalasi PLC di dalam Panel	29
Gambar 4.4 Instalasi embedded PC	30
Gambar 4.5 Instalasi Surveillance Camera.....	31
Gambar 4.6 Setting Modbus Setting	49
Gambar 4.7 PLC Ethernet Communication	50
Gambar 4.8 Human Machine Interface (LabVIEW).....	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Penelitian Terdahulu	9
Tabel 3.1 Diagram Alur Penelitian (Flowchart Metodologi)	11
Tabel 3.2 Skenario Pengujian Computer Vision	16
Tabel 3.3 Skenario Pengujian PLC	17
Tabel 4.1 Spesifikasi Computer Vision	34
Tabel 4.2 Perbandingan Singkat Computer Vision & Yolo	45
Tabel 4.3 Ringkasan Transformasi Data per Tahap	47
Tabel 5.1 Tabel Pengujian PLC	54
Tabel 5.2 Tabel Pengujian Jarak Camera	55
Tabel 5.3 Tabel Pengujian Keborocan	55
Tabel 5.4 Table data Sudut Camera	56
Tabel 5.5 Tabel Pengujian Waktu Response	57
Tabel 5.6 Tabel Prediksi Leak No Leak	59
Tabel 5.7 Table True-False persentase	59
Tabel 5.8 Tabel Durasi Pengoperasian Sistem	60
Tabel 5.9 Data Pengujian Waktu Operasional	60
Tabel 5.10 Tabel Pengujian Sistem Keseluruhan	63
Tabel 5.11 Hasil Persentase Akurasi	65

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem pengujian tekanan internal (internal pressure) merupakan prosedur vital dalam manufaktur produk-produk yang menanggung tekanan tinggi. Prosedur ini sangat penting untuk memastikan setiap produk, mulai dari bejana tekan hingga komponen perpipaan, aman dan memenuhi standar kualitas. Namun, terlepas dari pentingnya prosedur ini, area pengujian seringkali menjadi lokasi dengan risiko kecelakaan kerja yang signifikan. Kegagalan produk atau kelalaian dalam prosedur dapat berakibat fatal, membahayakan keselamatan pekerja, dan menyebabkan kerugian finansial yang besar. Saat ini, banyak industri masih mengandalkan sistem pengamanan yang bersifat konvensional. Sistem interlock yang digunakan umumnya masih bertumpu pada mekanis atau dikendalikan secara manual. Keterbatasan sistem ini menjadi sumber masalah utama. Prosedur pengujian yang berulang-ulang seringkali memicu kesalahan manusia, seperti lupa menutup katup dengan benar atau memasuki area berbahaya saat tekanan masih tinggi. Selain itu, sistem konvensional ini tidak proaktif, ia tidak bisa memantau kondisi secara real-time atau beradaptasi dengan situasi yang tidak terduga. Sistem ini hanya bisa bereaksi setelah masalah terjadi, bukan mencegahnya. Akibatnya, alur kerja menjadi kurang efisien, karena butuh pengawasan manual yang ketat dan pencatatan data yang konvensional (Suhir Ardiansyah , 2025).

Sistem interlock cerdas merupakan cara keamanan yang secara otomatis menghentikan proses kerja bila terjadi tindakan yang tidak benar, seperti adanya gerakan di area yang dilarang atau munculnya kerusakan pada sistem secara mendadak. Pemanfaatan sistem interlock cerdas tidak hanya meningkatkan tingkat keamanan tetapi juga memastikan efisiensi dalam operasional. Teknologi ini membantu mengenali masalah potensial secara lebih dini, mengurangi risiko terjadinya kecelakaan kerja, serta mencegah terganggunya proses produksi. Selain menjaga keselamatan bagi para pekerja, teknologi ini juga berperan penting dalam melindungi lingkungan dengan cara menghentikan operasi sebelum parameter mencapai tingkat yang berbahaya.

Melihat celah-celah tersebut, dibutuhkan sebuah solusi teknologi yang lebih canggih dan mampu meningkatkan keselamatan kerja secara signifikan. Sistem safety interlock berbasis Artificial Intelligence (AI) diajukan sebagai jawaban atas tantangan ini. Sistem ini dirancang untuk bekerja sebagai pengawas cerdas yang mampu memonitor, menganalisis, dan membuat keputusan otomatis. Dengan AI, sistem ini bisa memproses data dari berbagai sensor secara real-time untuk mendeteksi kondisi tidak aman, mengunci akses secara otomatis, dan bahkan memberikan notifikasi preventif kepada operator (Muhammad Arief Hidayat, 2022).

Dengan demikian, perancangan sistem ini memiliki tujuan ganda yaitu meningkatkan keamanan kerja secara proaktif dengan mengurangi ketergantungan pada faktor manusia serta memanfaatkan teknologi komputasi pada variabel utama terciptanya sistem safety interlock yang baik, sekaligus mengoptimalkan efisiensi operasional melalui otomatisasi.

Diharapkan, implementasi sistem ini dapat menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan produktif, sesuai dengan tuntutan industri 4.0.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, terdapat beberapa permasalahan utama yang menjadi fokus dalam penelitian ini. Permasalahan tersebut dirumuskan sebagai berikut:

Bagaimana merancang Safety Interlock System yang mampu mengatasi keterbatasan sistem interlock konvensional? Sistem keselamatan yang digunakan pada proses *internal pressure test* saat ini masih didominasi oleh sensor konvensional dan pengawasan manual oleh operator. Kondisi tersebut menyebabkan sistem memiliki keterbatasan dalam mendeteksi potensi bahaya secara dini serta masih rentan terhadap *human error*. Oleh karena itu, diperlukan suatu rancangan *Safety Interlock System* yang lebih adaptif, cerdas, dan mampu melakukan pengambilan keputusan secara otomatis berdasarkan kondisi aktual di area pengujian.

Bagaimana mengintegrasikan teknologi Computer Vision dan sensor industri ke dalam proses pengujian tekanan internal? Integrasi antara kamera termal, kamera visual, sensor industri, dan teknologi *Computer Vision* menjadi tantangan utama dalam membangun sistem keselamatan yang mampu melakukan pemantauan, deteksi objek, identifikasi kebocoran, serta analisis kondisi area pengujian secara *real-time*. Penelitian ini bertujuan menghasilkan sistem yang mampu mengolah data visual dan data sensor secara terpadu sebagai dasar pengambilan keputusan keselamatan.

Bagaimana mengembangkan sistem komputasi berbasis Artificial Intelligence yang mampu meningkatkan keselamatan kerja dan efisiensi operasional? Pemanfaatan algoritma *Artificial Intelligence* diharapkan tidak hanya meningkatkan akurasi deteksi kondisi berbahaya, tetapi juga mempercepat respons sistem dalam mencegah kecelakaan kerja, mengurangi ketergantungan terhadap pengawasan operator, serta meningkatkan efisiensi pelaksanaan proses *internal pressure test* tanpa mengurangi tingkat keselamatan.

Bagaimana membangun integrasi antara aplikasi Computer Vision dengan sistem kelistrikan dan kontrol industri dalam mekanisme Safety Interlock? Penelitian ini berfokus pada pengembangan mekanisme integrasi antara aplikasi *Computer Vision*, sistem kontrol berbasis PLC (*Programmable Logic Controller*), sensor keselamatan, dan antarmuka pengguna (*Human Machine Interface/HMI*). Integrasi tersebut diharapkan mampu menghasilkan sistem interlock yang memberikan informasi kondisi keselamatan secara *real-time*, mengaktifkan alarm, serta melakukan tindakan pengamanan secara otomatis sebelum proses produksi atau pengujian berlangsung.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Mendapatkan analisis hasil pengujian dengan cara merancang dan mengembangkan camera vision pada sistem interlock cerdas dengan mengotomatisasi prosedur pengamanan serta menghilangkan kemungkinan kesalahan yang disebabkan oleh manusia.
- b. Mengoptimalkan Efisiensi dengan cara Membuat sistem yang mampu memantau kondisi pengujian secara real-time serta memberikan peringatan sebelumnya, sehingga meningkatkan efisiensi proses kerja dan mengurangi ketergantungan pada pengawasan secara manual.
- c. Mencegah potensi Kegagalan dengan cara mengembangkan sistem yang dapat mendeteksi kondisi tidak aman lebih dini, secara otomatis mengunci akses, atau menghentikan proses sebelum terjadi kegagalan produk atau bahaya yang lebih besar.
- d. Menguji dan menganalisis kinerja sistem integrasi secara keseluruhan, yang mencakup validasi dan akurasi pembacaan instrumen pada instalasi yang berlaku.

1.4 Manfaat Penelitian

Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi pada:

- a) Integrasi domain kecerdasan buatan dengan merancang sistem camera vision dan menurunkan resiko kecelakaan kerja pada dunia industri.
- b) Pengembangan model safety interlock system untuk tujuan keberlanjutan.

Secara praktis, penelitian ini memberikan manfaat bagi berbagai pihak sebagai berikut:

1. **Manfaat bagi Pekerja:** Meningkatkan keselamatan dan perlindungan bagi pekerja dengan mengurangi paparan terhadap bahaya dan risiko kecelakaan kerja di area pengujian.
2. **Manfaat bagi Industri:** Mengurangi kerugian finansial akibat kecelakaan kerja dan kegagalan produk, serta meningkatkan produktivitas dan efisiensi operasional secara keseluruhan. Dengan penambahan Analisa hasil pengujian internal pressure
3. **Manfaat Teknologi:** Menyediakan solusi teknologi yang inovatif dan relevan dengan tuntutan Industri 4.0, serta menjadi landasan untuk pengembangan sistem keamanan cerdas di bidang lain.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut:

1. Peneliti hanya fokus pada Sistem camera vision AI yang mencakup teknologi untuk memaksimalkan kinerja sensor.

2. Sistem ini dirancang untuk berfungsi sebagai pengawas dan pengaman, tidak mencakup kontrol penuh terhadap proses pengujian secara keseluruhan.
3. Lokasi uji coba: Implementasi dan pengujian sistem dilakukan secara terbatas di area Industri khusus yang terdapat produk dengan kebutuhan pengujian seperti yang peneliti akan buat
4. Implementasi sistem akan dibatasi pada penggunaan sensor-sensor umum seperti sensor tekanan, sensor gerak dan tidak membahas integrasi dengan sistem kontrol pabrik yang lebih kompleks

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman, laporan penelitian ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

1. **BAB I – Pendahuluan**
Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.
2. **BAB II – Tinjauan Pustaka**
Menyajikan teori-teori dasar dan hasil penelitian terdahulu yang relevan, serta posisi dan kebaruan penelitian.
3. **BAB III – Metodologi Penelitian**
Menjelaskan metode pengumpulan data, perancangan sistem, implementasi teknologi, metode pengujian, serta analisis dampak sistem.
4. **BAB IV – Perancangan dan Implementasi Sistem**
Menguraikan rancangan arsitektur sistem, desain UI/UX aplikasi, serta rencana teknis implementasi komponen sistem menggunakan teknologi AI dan mobile application.
5. **BAB V – Hasil dan Pembahasan**
Menampilkan hasil implementasi, pengujian sistem, dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh.
6. **BAB VI – Kesimpulan dan Saran**
Berisi ringkasan hasil penelitian dan rekomendasi untuk pengembangan sistem ke depan.

1.7 Metode Penelitian dan Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan penelitian dan pengembangan (Research and Development atau R&D), yang berfokus pada perancangan, pengembangan, dan pengujian suatu sistem secara terstruktur. Metode ini dipilih karena tujuannya adalah menciptakan sebuah produk inovatif, yakni Safety Interlock System berbasis AI, untuk mengatasi permasalahan nyata di lingkungan industri. Metodologi ini dirancang secara komprehensif untuk mengevaluasi efektivitas sistem yang diusulkan dalam meningkatkan keselamatan kerja dan efisiensi operasional, khususnya di area pengujian tekanan internal.

Langkah-langkah penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 1.1 yang menggambarkan alur proses dari studi literatur hingga dokumentasi proposal, meliputi:

1. **Analisis Kebutuhan:** Mengidentifikasi kebutuhan sistem pengaman yang lebih canggih dengan studi literatur dan observasi terhadap prosedur pengujian tekanan internal yang ada. Tahap ini akan berfokus pada pemahaman risiko kecelakaan, keterbatasan sistem konvensional, serta spesifikasi teknis yang diperlukan.
2. **Perancangan Sistem:** Merancang arsitektur sistem secara keseluruhan, mulai dari pemilihan sensor, desain antarmuka pengguna (UI/UX), hingga perancangan model AI. Tahap ini akan menghasilkan diagram alur, *mock-up* antarmuka, dan spesifikasi teknis perangkat keras dan lunak.
3. **Pengembangan Sistem:** Mengimplementasikan perancangan menjadi sebuah prototipe. Tahap ini mencakup pengembangan perangkat keras (perakitan sensor dan mikrokontroler) dan perangkat lunak (pemrograman mikrokontroler, pengembangan model AI, dan pembuatan aplikasi antarmuka).
4. **Pengujian dan Evaluasi:** Melakukan serangkaian pengujian untuk memastikan fungsionalitas sistem. Pengujian akan dilakukan dalam beberapa fase, yaitu pengujian fungsionalitas setiap komponen, pengujian integrasi antarkomponen, dan pengujian simulasi skenario kegagalan untuk mengukur efektivitas sistem dalam mencegah bahaya.
5. **Analisis Hasil dan Pembahasan:** Menganalisis data dari hasil pengujian untuk mengevaluasi kinerja sistem dan membandingkannya dengan sistem konvensional. Hasil analisis ini akan menjadi dasar untuk perbaikan dan penyempurnaan prototipe.
6. **Penyusunan Laporan:** Mendokumentasikan seluruh proses penelitian, mulai dari analisis kebutuhan hingga hasil evaluasi, dalam format penulisan ilmiah yang sistematis.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Safety Interlock System

Sistem interlock adalah mekanisme keamanan otomatis yang bertujuan mencegah suatu proses berjalan jika kondisi keamanan belum terpenuhi. Fungsi utama interlock adalah melindungi manusia, peralatan, serta lingkungan dari bahaya yang mungkin terjadi akibat operasi mesin atau sistem yang tidak terkendali. Dalam industri pengujian tekanan, sistem interlock bekerja untuk memastikan bahwa tekanan tidak diberikan saat masih ada operator di dalam ruang uji atau saat pintu dan atap ruang belum tertutup dengan benar.

Suhir Ardiansyah. (2025), sistem interlock digunakan untuk mengatur urutan kerja dan keamanan dalam sistem perpipaan minyak berbasis PLC, dengan memanfaatkan limit switch, solenoid valve, dan sensor tekanan untuk mencegah kebocoran dan kesalahan prosedur. Penerapan sistem ini secara signifikan menurunkan risiko kecelakaan kerja dan meningkatkan efisiensi pengoperasian sistem.

2.2 Sistem Kontrol

Sistem kontrol pada sistem ini menggunakan PLC sebagai perangkat utama, PLC adalah perangkat digital yang dirancang untuk mengontrol proses industri melalui pemrograman logika. PLC bekerja dengan membaca input dari sensor, memproses logika program, lalu memberikan sinyal output ke perangkat seperti motor, valve, atau alarm. Keandalan, fleksibilitas, dan kemudahan pemrogramannya menjadikan PLC pilihan utama dalam otomasi industri modern. Dalam penelitian Suhir Ardiansyah. (2025), penggunaan PLC Schneider TM221CE16R memungkinkan kontrol dan monitoring interlock secara real-time. PLC mampu membaca sinyal analog dari sensor tekanan dan mengaktifkan aktuator seperti valve dan motor atap dengan akurasi tinggi.

2.3 Penggunaan Artificial Intelligence (AI) Dalam Sistem Vision

Pengolahan citra (image processing) adalah cabang ilmu komputer yang berfokus pada transformasi dan manipulasi citra digital untuk meningkatkan kualitas, mengekstrak informasi, atau memfasilitasi interpretasi citra oleh manusia atau sistem komputer. Intinya, ini adalah proses mengubah gambar menjadi bentuk yang lebih berguna atau informatif. Pengolahan citra berurusan dengan citra digital, yang merupakan representasi numerik dari gambar, biasanya dalam bentuk matriks piksel. Tujuan utama pengolahan citra adalah untuk:

- **Meningkatkan Kualitas:** Memperbaiki kejernihan, kontras, atau detail gambar.
- **Mengekstrak Informasi:** Mengidentifikasi objek, pola, atau fitur penting dalam gambar.
- **Memfasilitasi Interpretasi:** Membuat gambar lebih mudah dipahami oleh manusia atau sistem komputer, seperti dalam visi komputer. Berbagai teknik digunakan dalam pengolahan citra, termasuk:

- **Filter:** Menghilangkan noise atau detail yang tidak diinginkan.
- **Segmentasi:** Memisahkan gambar menjadi bagian-bagian yang berbeda.
- **Deteksi Fitur:** Mengidentifikasi elemen penting dalam gambar.
- **Pengolahan Warna:** Memanipulasi warna gambar.

2.4 Teknologi Computer Vision

Teknologi Computer Vision merupakan cabang dari kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) yang memungkinkan sistem untuk memperoleh, mengolah, menganalisis, dan menginterpretasikan informasi visual dari citra atau video secara otomatis. Dalam penelitian ini, teknologi Computer Vision diterapkan sebagai komponen utama pada Safety Interlock System untuk melakukan deteksi keberadaan manusia (human detection) di dalam area pressure test. Proses deteksi dilakukan menggunakan kamera pengawas (surveillance camera) yang dikombinasikan dengan algoritma deteksi objek berbasis Deep Learning, yaitu You Only Look Once (YOLO).

Algoritma YOLO dipilih karena memiliki kemampuan melakukan deteksi objek secara cepat (real-time object detection) dengan tingkat akurasi yang tinggi melalui mekanisme single-stage detection. Setiap citra yang diperoleh dari kamera diproses secara langsung untuk mengidentifikasi keberadaan manusia, menentukan posisi objek (bounding box), serta menghitung tingkat kepercayaan (confidence score) terhadap hasil deteksi. Informasi tersebut kemudian digunakan sebagai salah satu parameter utama dalam logika Safety Interlock, sehingga proses pressure test hanya dapat dijalankan apabila sistem memastikan bahwa tidak terdapat operator maupun personel di dalam zona berbahaya.

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Arief Hidayat (2022) mengenai implementasi YOLOv5 pada sistem pengawasan lalu lintas menunjukkan bahwa algoritma tersebut mampu mencapai tingkat akurasi deteksi sebesar 95,27% dengan performa yang memenuhi kebutuhan aplikasi real-time. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa YOLO memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mendeteksi objek pada lingkungan dinamis, sehingga relevan untuk diadaptasi pada sistem keselamatan industri. Dalam konteks penelitian ini, kemampuan tersebut dimanfaatkan untuk meningkatkan keandalan sistem interlock melalui deteksi otomatis terhadap keberadaan manusia sebelum maupun selama proses pressure test berlangsung.

2.5 Standard Keselamatan Sistem Interlock Industri

Untuk memastikan sistem interlock memenuhi persyaratan keselamatan internasional, berbagai standar teknis dan regulasi industri dijadikan acuan dalam perancangan sistem ini. Beberapa di antaranya adalah:

- IEC 60204-1 – Standar internasional terkait perlengkapan listrik pada mesin industri, termasuk keharusan adanya sistem interlock pada mesin berbahaya.
- ISO 13849-1 – Standar tentang sistem kontrol keselamatan pada mesin, termasuk kategorisasi tingkat risiko dan performa sistem interlock.

- OSHA 1910 Subpart O – Regulasi dari lembaga keselamatan kerja Amerika Serikat yang mengatur tentang pengamanan mesin.

Penerapan standar ini memastikan bahwa desain sistem interlock tidak hanya bekerja secara teknis, namun juga memenuhi aspek legal dan safety compliance.

2.6 Komponen Utama Sistem Perancangan

Sistem interlock yang dirancang pada penelitian ini terdiri dari berbagai perangkat elektrik dan elektronik yang saling terintegrasi untuk menjamin keselamatan dan efisiensi operasional ruang pengujian tekanan. Komponen utama sistem meliputi:

Programmable Logic Controller dengan komunikasi modbus protocol

- Modul Ekspansi Analog
- Pressure Sensor
- Gas Leakage sensor
- Temperature sensor
- Electrical Solenoid Valve
- Safety Door Lock
- Limit Switch
- Signal indicator
- Surveillance Camera
- Embedded PC

Setiap komponen ini berperan penting dalam integrasi sistem yang memungkinkan proses pengujian tekanan berlangsung secara aman dan terkendali.

2.7 Studi Smart Manufacturing

Industri 4.0 merupakan fase revolusi industri keempat yang ditandai dengan digitalisasi menyeluruh pada proses manufaktur, dengan integrasi teknologi seperti Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data, Cyber Physical Systems, dan sistem otomasi cerdas. Tujuannya adalah menciptakan pabrik pintar (Smart Factory) yang mampu beroperasi secara fleksibel, efisien, adaptif, dan terhubung penuh antar sistem produksi dan manajemen data.

Menurut Akim Windaru. (2019), Smart Manufacturing System dalam konteks Industri 4.0 merupakan sistem produksi yang otomatis, modular, dan cerdas, dengan dukungan konektivitas data secara real-time antara sistem fisik dan digital. Hal ini memungkinkan pabrik untuk mengambil keputusan yang lebih cepat, melakukan prediksi kondisi operasional, serta menyesuaikan produksi sesuai kebutuhan pelanggan.

2.8 Penelitian Sebelumnya

Sistem interlock juga diterapkan pada bidang lain, seperti sistem pintu otomatis pada ruang sterilisasi rumah sakit. Dalam penelitian oleh Habibi et al. (2022), sistem

interlock prototipe dikembangkan menggunakan Arduino untuk mengontrol buka-tutup pintu ruang sterilisasi. Penggunaan sensor pintu, relay, dan buzzer memungkinkan penguncian otomatis untuk menjaga sterilisasi tetap terjaga.

Tabel 2.1 Data Penelitian Terdahulu

Peneliti/Tahun	Teknologi yang Digunakan	Platform/Kontrol	Aplikasi Sistem	Fokus Penelitian & Temuan Kunci
Suhir Ardiansyah. (2025)	Sensor suhu, relay, LCD, buzzer	Arduino Uno, Mikrokontroler	Interlock pintu ruang sterilisasi	Sistem interlock berbasis mikrokontroler untuk mencegah pembukaan pintu ganda di ruang steril.
Akim Windaru. (2019)	Sensor suhu & tekanan, ESP32, Firebase	ESP32, Firebase (IoT)	Smart Monitoring	Implementasi Firebase sebagai basis kontrol dan pemantauan sistem monitoring berbasis cloud.
Muhammad Hasanujjaman. (2023)	Kamera ESP-EYE, Sensor suhu/tekanan, IoT, AI Vision	ESP32 +MQTT	Interlock Cleanroom	Sistem interlock cerdas berbasis Machine vision dan IoT untuk mendeteksi keberadaan manusia
Mahmud Ghifari. (2022)	Sensor tekanan, solenoid valve, PLC Schneider	PLC Schneider	Oil Flowmeter Interlock	Sistem interlock berbasis PLC untuk memantau tekanan dan mengontrol katup dalam sistem fluida.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penyelesaian Masalah

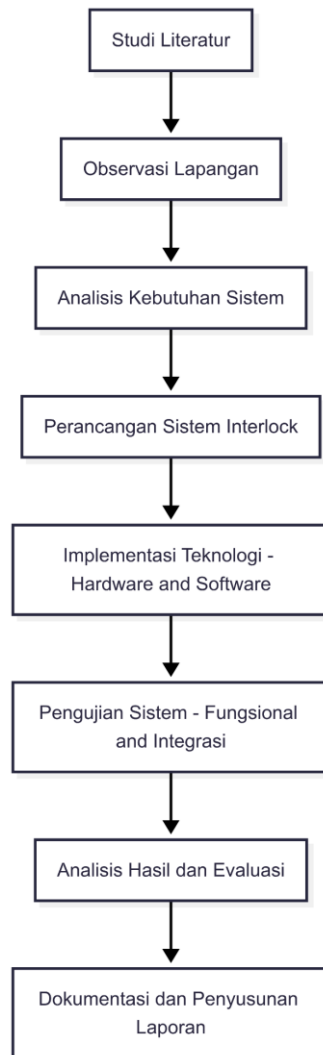
Tahap ini merupakan fondasi awal penelitian yang dilakukan untuk mengumpulkan informasi relevan. Pendekatan yang digunakan adalah perpaduan antara metode kuantitatif yang dominan dan didukung oleh data kualitatif dari survei pengguna⁴. di mana sistem deteksi kebocoran berbasis thermal camera dikembangkan dan diuji menggunakan algoritma AI untuk mengenali pola kebocoran berdasarkan distribusi suhu. Proses pengumpulan data meliputi:

- a. **Analisis Kebutuhan:** Mengidentifikasi kebutuhan spesifik akan sistem pengamanan yang lebih canggih melalui studi literatur dan observasi mendalam terhadap prosedur pengujian tekanan internal yang berlaku saat ini⁵. Tahap ini berfokus pada pemahaman risiko kecelakaan, keterbatasan sistem konvensional, serta spesifikasi teknis yang diperlukan untuk mengembangkan solusi yang efektif.
- b. **Studi Literatur:** Mengkaji teori-teori dasar dan hasil penelitian terdahulu yang relevan untuk memperkuat landasan teoretis. Tinjauan pustaka ini mencakup konsep-konsep seperti *AI untuk prediksi emisi*, *Computer Vision untuk deteksi kendaraan*, dan *Aplikasi Mobile Jejak Karbon*⁷. Selain itu, studi ini juga mengulas posisi dan kebaruan penelitian ini dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya.
 - Meneliti konsep thermal imaging, prinsip kerja thermal camera.
 - Memahami teori kebocoran dan pola distribusi panas pada objek (misalnya pipa, tangki, dll).
 - Mempelajari metode image processing dan computer vision untuk thermal image.

Mengkaji algoritma AI yang cocok, seperti CNN (*Convolutional Neural Network*), YOLO, atau Faster R-CNN.

- a. **Survei Pengguna:** Mengumpulkan data kualitatif dari pengguna potensial atau operator yang bekerja di area pengujian. Data ini penting untuk memahami perspektif, tantangan, dan harapan mereka terhadap sistem yang akan dikembangkan, sehingga desain yang dihasilkan dapat lebih mudah digunakan (*user-friendly*) dan relevan dengan kebutuhan praktis di lapangan.

Tabel 3.1 Diagram Alur Penelitian (Flowchart Metodologi)



3.2 Perancangan Masalah

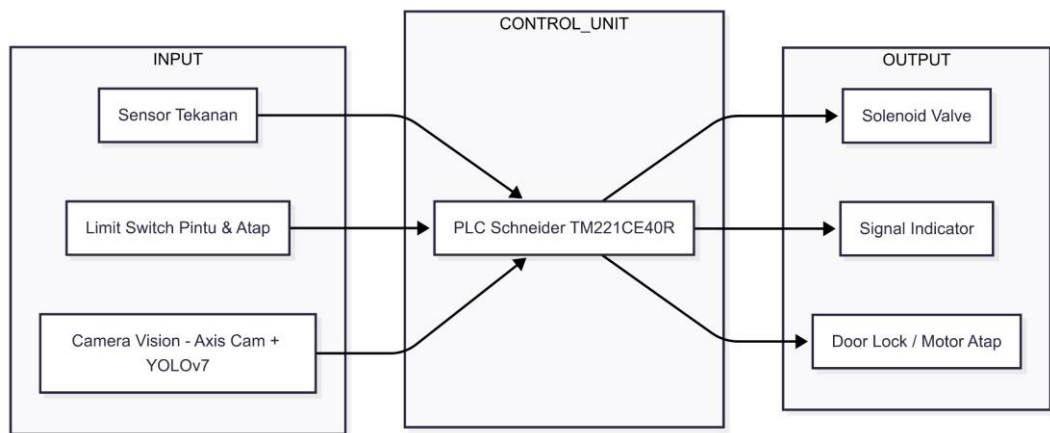
Setelah data terkumpul, langkah selanjutnya adalah perancangan sistem secara terperinci. Tahap ini bertujuan untuk menciptakan cetak biru dari seluruh arsitektur sistem, meliputi:

- Thermal camera (resolusi, rentang suhu, frame rate).
- Perangkat komputasi (PC/embedded system).
- Lingkungan uji (pipa berisi fluida, tangki, dll).

- a. **Diagram Alir (*Flowchart*)**: Merancang alur kerja sistem secara keseluruhan, mulai dari proses identifikasi masalah hingga evaluasi kinerja dan penyusunan laporan akhir. Diagram ini juga mencakup tahapan pengembangan dan validasi sistem yang telah ditentukan sebelumnya.

- b. **Perancangan Sistem (*Hardware* dan *Software*):** Merancang arsitektur sistem secara keseluruhan, mulai dari pemilihan hardware, desain antarmuka pengguna (*UI/UX*), hingga perancangan model AI. Tahap ini akan menghasilkan diagram alur, *mock-up* antarmuka, dan spesifikasi teknis perangkat keras dan lunak.
- c. **Arsitektur sistem:** Diagram alur penelitian yang mencakup proses dari studi literatur hingga dokumentasi proposal, meliputi analisis kebutuhan, perancangan sistem, pengembangan sistem, pengujian dan evaluasi, analisis hasil dan pembahasan, serta penyusunan laporan.

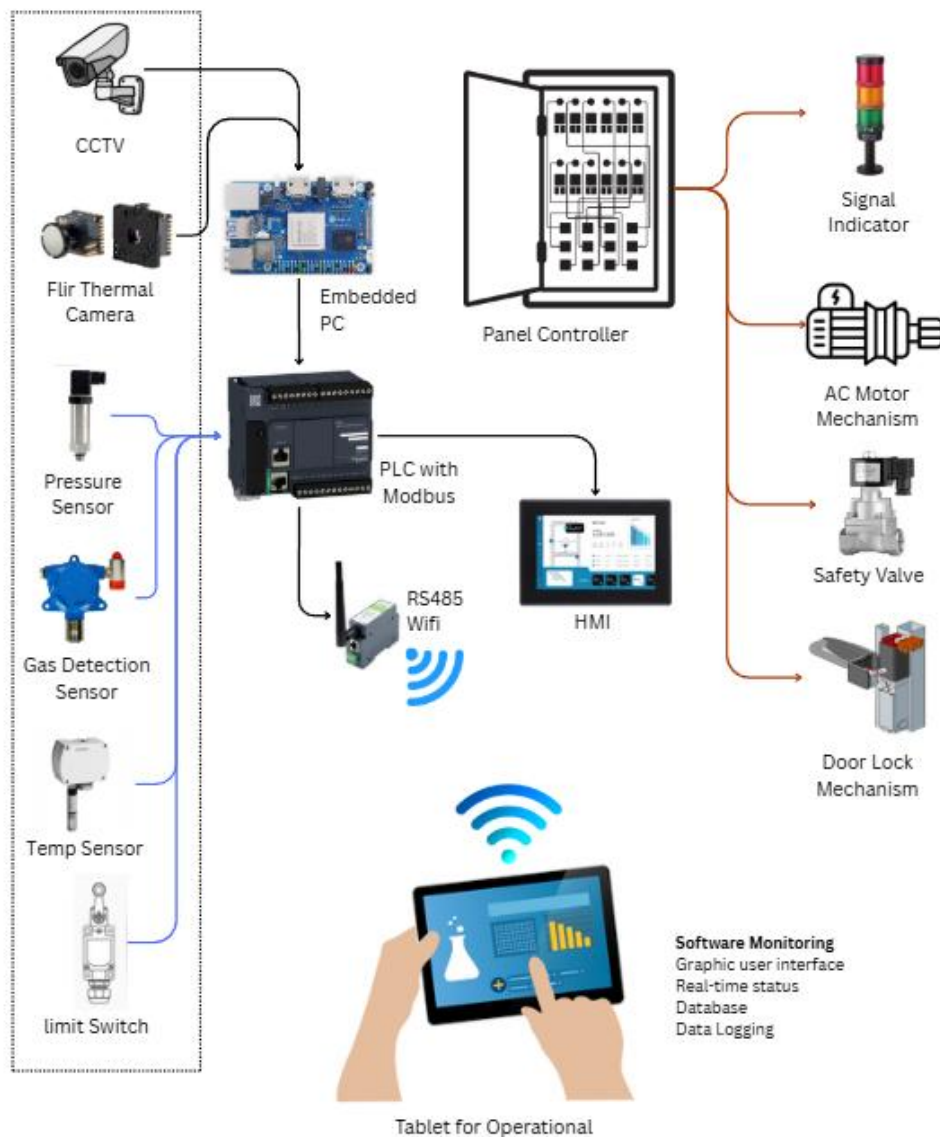
Sensor → Data Acquisition → Pre-processing → Model AI → Output deteksi



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Interlock

3.3 Implementasi Teknologi

Tahap ini merupakan realisasi dari perancangan yang telah dibuat, di mana prototipe sistem dibangun secara fisik dan digital.



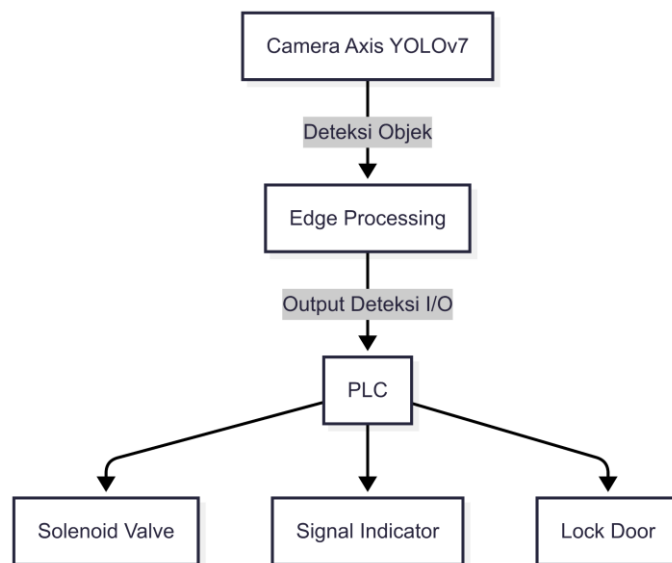
Gambar 3.2 Arsitektur Perangkat

Implementasi teknologi berfokus pada integrasi perangkat keras dan perangkat lunak yang dipilih, sebagai berikut:

1. **Perangkat Keras:** Sistem akan mengintegrasikan sensor-sensor umum, seperti sensor tekanan, sensor gerak, dan sensor limit pada pintu/atap untuk mendeteksi kondisi lingkungan. Aktuator, seperti motor atap dan kunci pintu elektrik, akan berfungsi sebagai penggerak sistem berdasarkan perintah dari PLC. Pengendalian utama akan menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) yang dirancang untuk mengontrol proses industri melalui pemrograman logika.
2. **Perangkat Lunak:**
 - a. **Sistem Vision Berbasis AI:** Pemanfaatan teknologi computer vision untuk mendeteksi objek atau aktivitas melalui kamera. Sistem ini akan

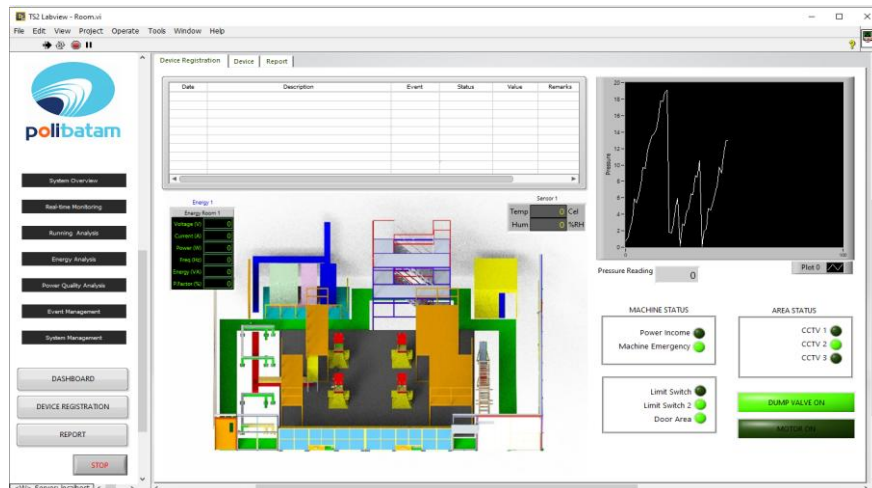
menggunakan algoritma YOLO (You Only Look Once), yang dikenal mampu mendeteksi objek secara cepat dan akurat dalam waktu nyata (real-time). Algoritma YOLOv5, misalnya, memiliki akurasi hingga 95,27% dan sangat cocok untuk diterapkan pada sistem pengawasan dinamis.

- b. **Edge Camera:** Implementasi teknologi ini akan menggunakan kamera yang memiliki kemampuan edge computing. Fitur ini memungkinkan pemrosesan data, seperti deteksi objek, untuk dilakukan secara langsung di perangkat kamera. Hal ini secara signifikan mengurangi latensi dan beban pada server, menjadikannya solusi yang ideal untuk sistem real-time seperti safety interlock.



Gambar 3.3 Arsitektur Sistem AI + Kamera (Edge AI)

- c. **Pengembangan Model AI dan Aplikasi:** Melakukan implementasi teknis menggunakan bahasa pemrograman dan *framework* yang relevan untuk mengembangkan model AI dan aplikasi antarmuka.
- d. **Tampilan Antar Muka & Sistem Kontrol :** Penggunaan Software LabVIEW yang menyediakan platform yang komprehensif dan efisien untuk merancang dan mengimplementasikan Safety Interlock Berbasis AI. Kekuatan LabVIEW terletak pada antarmuka grafisnya yang intuitif, kemampuan akuisisi data yang luas, dan fleksibilitas dalam mengimplementasikan logika kontrol yang kompleks, termasuk integrasi dengan komponen kecerdasan buatan. Dengan pendekatan yang tepat, sistem ini dapat secara signifikan meningkatkan keamanan operasional di area pengujian bertekanan tinggi.



Gambar 3.4 Tampilan Antar Muka & Sistem Kontrol

3.4 Skenario Pengujian Sistem

Dokumen ini menyajikan rencana strategis pelaksanaan proyek transformasi digital untuk meningkatkan efisiensi operasional, mempercepat alur kerja layanan, dan mengoptimalkan pengelolaan data secara terintegrasi. Implementasi sistem baru ini dirancang untuk memberikan skalabilitas jangka panjang serta keamanan data yang andal.

3.4.1 Tujuan dan Sasaran

- Otomatisasi Proses Bisnis: Mengurangi alur kerja manual hingga 40% dalam 6 bulan pertama.
- Peningkatan Keamanan Data: Menerapkan standar enkripsi data end-to-end dan kontrol akses berbasis peran (RBAC).
- Integrasi Layanan Terpusat
- Efisiensi Biaya Operasional

3.4.2 Skenario Pengujian Computer Vision

Tujuan dari skenario ini adalah memastikan sistem memblokir proses pengujian jika terdapat operator di area berbahaya (ROI).

1 TC-CV-01: Deteksi Manusia pada Region of Interest (ROI)

- **Kondisi Masukan:** Operator berada di zona *pressure test* saat sistem berstatus *Standby/Idle*. Kamera *Surveillance* menangkap citra.
- **Kriteria Keberhasilan:** Model YOLOv5 mendeteksi objek manusia (*Confidence* $\geq 85\%$), membentuk *Bounding Box*, dan mengirim sinyal digital *Human_Detected = HIGH* ke PLC.

2 TC-CV-02: Interlock Start saat Operator di Area Berbahaya

- **Kondisi Masukan:** Operator berada di zona ROI. Operator utama menekan tombol "START" pengujian di HMI.

- **Kriteria Keberhasilan:** PLC memblokir perintah *Start*. *Solenoid Valve* tetap tertutup (*CLOSED*), *Magnetic Door Lock* tidak mengunci, serta *Buzzer/Beacon Alarm* aktif.
- 3 **TC-CV-03: Filtering Objek di Luar ROI (Mencegah False Alarm)**
- **Kondisi Masukan:** Personel berjalan di luar batas area uji (area pejalan kaki).
 - **Kriteria Keberhasilan:** YOLO mendeteksi manusia tetapi membatalkan sinyal bahaya karena berada di luar koordinat ROI. Status *Interlock* tetap *CLEAR* (Aman).
 -

Tabel 3.2 Skenario Pengujian Computer Vision

ID Pengujian	Skenario	Kondisi Pengujian	Kriteria Keberhasilan
TC-CV-01	Deteksi manusia pada ROI	Operator berada di area pressure test	YOLOv5 mendeteksi manusia (Confidence $\geq$ 85%), membentuk bounding box, dan mengirim sinyal Human_Detected = HIGH ke PLC.
TC-CV-02	Interlock saat operator berada di ROI	Tombol START ditekan ketika operator masih berada di area berbahaya	PLC menolak proses Start , solenoid valve tetap tertutup, magnetic door lock tidak mengunci, dan alarm aktif.
TC-CV-03	Filtering objek di luar ROI	Personel berada di luar area pressure test	YOLO mendeteksi manusia tetapi tidak mengaktifkan interlock karena berada di luar ROI. Status sistem tetap CLEAR .

3.4.3 Skenario Pengujian Thermal Inspection (Deteksi Kebocoran Gas)

Mengevaluasi sensitivitas kamera termal dan model AI dalam mendeteksi anomali temperatur/kebocoran.

1 TC-TH-01: Variasi Tingkat Kebocoran Gas (*Leak Rate*)

- **Kondisi Masukan:** Kebocoran disimulasikan menggunakan katup variabel pada tingkat 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%.
- Hasil Aktual Bab 5:
 - Leak Rate 0%: No Leak Detected (Confidence 2%).
 - Leak Rate 5%: Leak Detected (Confidence 83%).
 - Leak Rate 10%–20%: Leak Detected (Confidence 91%–99%).

Kriteria Keberhasilan: Sistem berhasil mendeteksi kebocoran dan mengirimkan sinyal Thermal Alarm ke PLC saat Leak Rate > 5%.

2 TC-TH-02: Evaluasi Sudut Pemasangan Kamera Thermal (*Camera Angle*)

- Kondisi Masukan: Pengujian dilakukan pada variasi sudut kamera 0°, 15°, 30°, 45°, dan 60°.
- Hasil Aktual Bab 5:
 - Sudut 0°–30°: AI Detection = Leak (Confidence 96%–99%), Waktu deteksi < 0.47 detik
 - Sudut 60°: AI Detection = Leak (Confidence 85%), Waktu deteksi 0.70 detik.
 - Kesimpulan Pengujian: Sudut optimal rekomendasi pemasangan kamera adalah > 45°.

3.4.4 Skenario Pengujian Logika Safety Interlock PLC

Tabel 3.3 Skenario Pengujian PLC

ID Pengujian	Skenario	Kondisi Pengujian	Respons Sistem	Status
TC-PLC-01	Normal Start	Semua kondisi aman	Valve On dapat dijalankan dan door lock aktif	PASS
TC-PLC-02	Overpressure	Tekanan > 10.500 PSI	Pompa berhenti otomatis dan vent valve membuka	PASS
TC-PLC-03	Holding Pressure	Tekanan mencapai 10.000 PSI	Pompa berhenti, isolation valve menutup, timer holding aktif	PASS
TC-PLC-04	Emergency Stop	Tombol E-Stop ditekan	Pompa berhenti, vent valve membuka penuh, alarm aktif	PASS

Pengujian logika **Safety Interlock** dilakukan untuk memverifikasi bahwa **Programmable Logic Controller (PLC) Schneider Modicon TM221** mampu menjalankan seluruh logika kontrol keselamatan sesuai dengan rancangan sistem. PLC berfungsi sebagai pengendali utama (*main controller*) yang menerima sinyal masukan dari sistem **Computer Vision**, **Thermal Vision Camera**, **sensor tekanan**, dan perangkat keselamatan lainnya, kemudian mengolah informasi tersebut menjadi keputusan untuk mengendalikan aktuator seperti **Hydraulic Power Unit (HPU)**, **solenoid valve**, **magnetic door lock**, **alarm**, serta indikator visual.

Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa setiap kondisi operasi maupun kondisi abnormal dapat direspons secara otomatis oleh PLC sesuai prinsip **Safety Interlock**, sehingga potensi kecelakaan akibat kesalahan operator (*human error*) maupun kegagalan proses dapat diminimalkan.

3.4.5 Ringkasan Skenario Pengujian

Pengujian logika Safety Interlock dilakukan untuk memverifikasi bahwa PLC Schneider Modicon TM221 mampu menjalankan fungsi pengendalian dan keselamatan sesuai dengan logika yang telah dirancang. PLC berfungsi sebagai pengendali utama yang menerima berbagai masukan (input) dari sistem Computer Vision, Thermal Vision Camera, sensor tekanan, Emergency Stop, dan perangkat pendukung lainnya. Berdasarkan kondisi masukan tersebut, PLC akan memproses logika interlock dan mengendalikan aktuator seperti Hydraulic Power Unit (HPU), solenoid valve, vent valve, magnetic door lock, alarm, dan warning beacon.

Pengujian dilakukan melalui beberapa skenario yang mewakili kondisi operasi normal, kondisi abnormal, dan kondisi darurat yang mungkin terjadi selama proses pressure test. Setiap skenario bertujuan untuk memastikan bahwa PLC mampu mengambil keputusan secara otomatis, cepat, dan konsisten sesuai prinsip fail-safe, yaitu sistem selalu berpindah ke kondisi paling aman apabila terjadi potensi bahaya atau kegagalan sistem. Secara umum, skenario pengujian meliputi:

1 Normal Start Sequence

Skenario ini bertujuan untuk memastikan bahwa proses pressure test hanya dapat dimulai apabila seluruh parameter keselamatan telah terpenuhi. PLC akan memverifikasi kondisi awal seperti tekanan sistem masih nol, posisi valve sesuai prosedur, tidak terdapat operator di area berbahaya berdasarkan hasil deteksi Computer Vision, dan tidak ada alarm aktif. Apabila seluruh kondisi memenuhi persyaratan, PLC akan mengaktifkan Hydraulic Power Unit (HPU), mengunci pintu ruang uji (magnetic door lock), dan mengizinkan proses pressure test dimulai.

2 Human Detection Safety Interlock

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa PLC mampu mencegah dimulainya proses pressure test apabila sistem Computer Vision mendeteksi keberadaan operator di dalam Region of Interest (ROI). Ketika sinyal Human Detected diterima dari AI, PLC akan membatalkan seluruh proses start, mempertahankan kondisi aktuator pada keadaan aman, serta mengaktifkan alarm sebagai peringatan kepada operator. Skenario ini bertujuan untuk meminimalkan risiko kecelakaan akibat keberadaan personel di area berbahaya.

3 Leak Detection Safety Interlock

Skenario ini mengevaluasi kemampuan PLC dalam merespons hasil deteksi kebocoran yang dikirimkan oleh sistem Thermal Vision. Ketika AI mengidentifikasi adanya indikasi kebocoran gas, PLC harus segera menghentikan proses pressure test, mematikan pompa HPU, membuka vent valve untuk mengurangi tekanan, mempertahankan pintu dalam kondisi terkunci, serta mengaktifkan alarm visual dan

audio. Pengujian ini memastikan bahwa sistem mampu mengisolasi kondisi berbahaya secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator.

4 Overpressure Protection

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan kondisi tekanan yang melebihi batas operasi yang telah ditentukan. Ketika sensor tekanan mengirimkan nilai di atas batas maksimum, PLC harus segera menghentikan pompa HPU dan membuka vent valve untuk menurunkan tekanan hingga kembali ke batas aman. Pengujian ini bertujuan memastikan sistem mampu melindungi peralatan uji maupun operator dari risiko kerusakan akibat tekanan berlebih.

1. Holding Pressure Sequence

Setelah tekanan target tercapai, PLC harus menjalankan logika holding pressure, yaitu menghentikan pompa, menutup isolation valve, dan mempertahankan tekanan selama waktu pengujian sesuai standar prosedur. Selama fase ini, PLC terus memonitor tekanan, status kebocoran, dan keberadaan operator untuk memastikan seluruh parameter tetap berada dalam kondisi aman.

2. Emergency Stop (E-Stop)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons sistem ketika tombol Emergency Stop diaktifkan. Pada kondisi tersebut, PLC harus segera menghentikan seluruh proses, mematikan pompa HPU, membuka vent valve secara penuh untuk melepaskan tekanan, mengaktifkan alarm darurat, dan mempertahankan seluruh sistem pada kondisi aman hingga dilakukan proses reset oleh operator yang berwenang.

3. Fail-Safe System

Skenario ini menguji kemampuan PLC dalam menghadapi kondisi kegagalan sistem, seperti putusnya komunikasi dengan Computer Vision, kegagalan Thermal Vision Camera, hilangnya sinyal sensor, atau gangguan pada komputer AI. Dalam seluruh kondisi tersebut, PLC harus menganggap sistem berada pada kondisi tidak aman (unsafe) dan secara otomatis mempertahankan mekanisme Safety Interlock dalam keadaan aktif, yaitu proses pressure test dihentikan, pintu tetap terkunci, dan alarm diaktifkan hingga gangguan berhasil diatasi.

3.5 Lingkungan Pengujian (Test Environment)

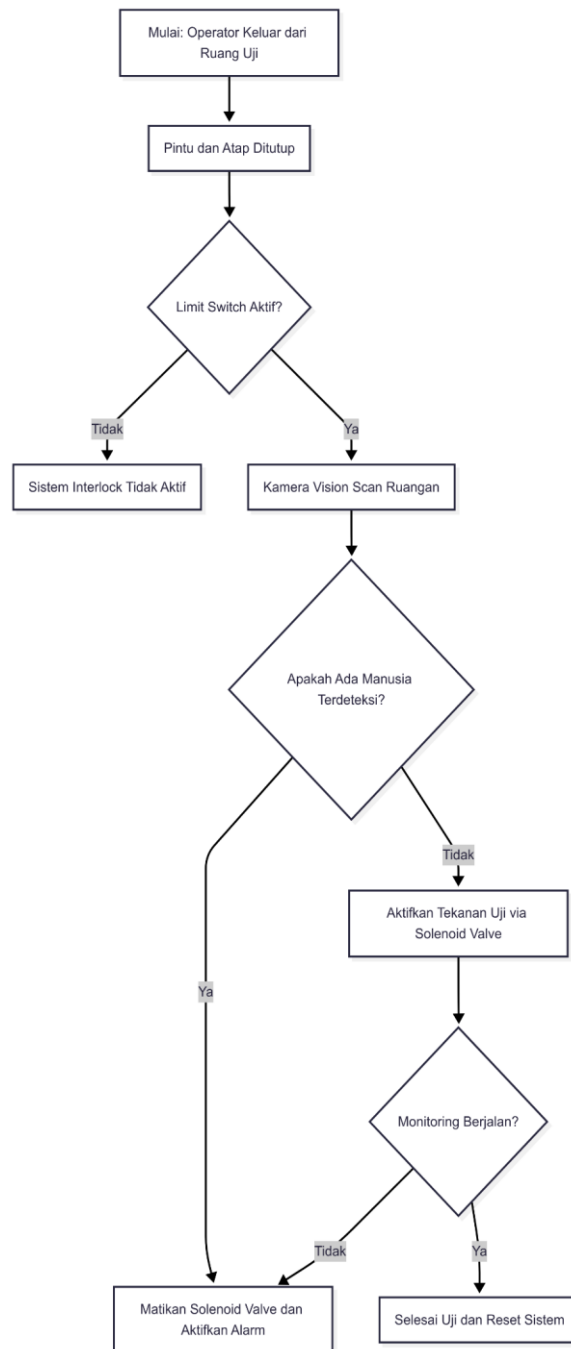
Pengujian dilakukan pada prototipe Pressure Test Safety System yang telah diimplementasikan, sistem terdiri atas beberapa komponen utama. Seluruh perangkat dihubungkan melalui jaringan komunikasi industri sehingga mampu bertukar data secara real-time selama proses pengujian berlangsung.

3.6 Metode Pengujian Sistem

Pengujian merupakan tahap krusial untuk memvalidasi fungsionalitas dan kinerja sistem. Serangkaian pengujian akan dilakukan dalam beberapa fase:

- a) **Pengujian Fungsionalitas:** Memastikan bahwa setiap komponen, baik perangkat keras maupun lunak, berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.
- b) **Pengujian Integrasi:** Menguji kolaborasi antar komponen untuk memastikan bahwa seluruh sistem dapat bekerja secara sinergis.
- c) **Pengujian Simulasi Skenario Gangguan:** Melakukan simulasi terhadap skenario bahaya atau kesalahan prosedur, seperti adanya operator di area pengujian saat tekanan sedang tinggi, untuk mengukur efektivitas sistem dalam mencegah kecelakaan.
- d) **Black-box Testing:** Menguji fungsionalitas sistem dari sudut pandang pengguna tanpa perlu memahami strukturnya.
- e) **Usability Testing:** dalam penelitian ini, tujuannya adalah untuk mengukur tingkat kemudahan penggunaan sistem oleh operator, yang merupakan indikator penting dalam penerimaan teknologi di lapangan. Pengujian ini akan melibatkan pengguna potensial atau operator yang bekerja di area pengujian untuk memahami perspektif, tantangan, dan harapan mereka terhadap sistem yang akan dikembangkan.
- f) **Pengujian error learning pada Sistem AI :** Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana sistem kecerdasan buatan (AI) belajar dari kesalahan atau kondisi yang tidak terduga. Fokusnya adalah untuk memastikan bahwa model AI, seperti YOLOv5 yang digunakan untuk deteksi keberadaan manusia, dapat beradaptasi dan meningkatkan akurasi seiring waktu, terutama ketika menghadapi skenario yang belum pernah ditemui sebelumnya. Hal ini juga mencakup verifikasi apakah sistem dapat mengidentifikasi dan meminimalkan kesalahan deteksi atau klasifikasi objek yang dapat memengaruhi keputusan interlock.
 - a. **Pengujian Respon time :** Pengujian ini mengecek seberapa cepat sistem bisa merespons perubahan kondisi atau mendeteksi bahaya. Dalam sistem interlock keselamatan, waktu respons sangat penting karena berkaitan langsung dengan keamanan pekerja. Uji ini memastikan sistem bisa secara otomatis menghentikan proses atau memicu alarm dengan cepat ketika kondisi tidak aman ditemukan, seperti saat ada orang di area pengujian saat tekanan sedang tinggi. Waktu respons yang cepat sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya kecelakaan.
 - b. **Pengujian Kestabilan dan Keandalan :** Pengujian ini menilai kemampuan sistem untuk beroperasi secara konsisten dan andal dalam jangka waktu yang lama di bawah berbagai kondisi operasional. Ini mencakup

pengujian terhadap stabilitas koneksi antar komponen (sensor, PLC, kamera AI), keandalan aktuator (solenoid valve, door lock, alarm) dalam merespons perintah, serta ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal atau fluktuasi daya. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa sistem interlock dapat berfungsi tanpa henti dan tanpa kegagalan yang tidak terduga, menjaga tingkat keamanan yang tinggi secara berkelanjutan.



Gambar 3.5 Flowchart Alur Kerja Interlock

3.7 Metode Pengumpulan Data

Tahap awal dalam pengembangan sistem deteksi kebocoran menggunakan Thermal Inspection Camera adalah proses akuisisi dataset citra termal. Pengambilan data dilakukan dengan merekam citra termal pada dua kondisi utama, yaitu kondisi normal (tanpa kebocoran) dan kondisi abnormal (terjadi kebocoran). Kedua kondisi tersebut direkam secara sistematis untuk menghasilkan variasi data yang mampu merepresentasikan karakteristik operasional pada proses pressure test.

Agar model yang dikembangkan memiliki kemampuan generalisasi yang baik, proses pengambilan citra dilakukan dengan memvariasikan beberapa parameter pengujian. Variasi tersebut meliputi jarak pemasangan kamera terhadap objek uji, jenis fluida yang digunakan, suhu lingkungan pengujian, serta tingkat atau besar kebocoran yang disimulasikan. Variasi parameter ini bertujuan untuk memperoleh beragam pola distribusi temperatur sehingga sistem tidak hanya mengenali satu kondisi tertentu, tetapi juga mampu mendeteksi kebocoran pada berbagai skenario operasional yang mungkin terjadi di lapangan.

Seluruh citra termal yang berhasil dikumpulkan kemudian diberi label (labeling) sesuai dengan kondisi pengujian, seperti Normal, Minor Leakage, dan Major Leakage, sehingga setiap data memiliki informasi kelas yang jelas untuk proses pembelajaran algoritma. Dataset yang telah diberi label selanjutnya dibagi menjadi dua kelompok, yaitu dataset latih (training dataset) yang digunakan untuk melatih model Computer Vision dalam mengenali pola distribusi temperatur, serta dataset uji (testing dataset) yang digunakan untuk mengevaluasi performa model secara objektif terhadap data yang belum pernah digunakan selama proses pelatihan. Pembagian dataset dilakukan dengan rasio yang sesuai, misalnya 80% untuk data latih dan 20% untuk data uji, guna memastikan model memiliki kemampuan prediksi yang baik serta meminimalkan risiko overfitting.

- a. **Observasi langsung terhadap system yang sedang diuji :** Peneliti akan secara langsung mengamati sistem yang sedang diuji untuk memperoleh pemahaman tentang potensi bahaya dan keterbatasan sistem pengaman tradisional yang saat ini digunakan di area pengujian tekanan internal. Pengamatan ini juga akan memberikan gambaran komprehensif mengenai prosedur pengujian tekanan yang berlaku.
- b. **Umpan balik pengujian sistem kepada karyawan dan operator :** Untuk mendapatkan perspektif pengguna, data kualitatif akan dikumpulkan dari operator atau karyawan yang berpotensi menggunakan sistem di area pengujian. Informasi ini krusial untuk memastikan bahwa desain sistem yang dihasilkan mudah digunakan (user-friendly) dan sesuai dengan kebutuhan praktis di lapangan.
- c. **Dokumen Hasil Pengujian :** Dokumen ini akan berisi seluruh data yang terkumpul dari berbagai jenis pengujian yang dilakukan, seperti pengujian

fungsionalitas, integrasi, simulasi skenario gangguan, *black-box testing*, *usability testing*, pengujian pembelajaran kesalahan pada AI, pengujian waktu respon, serta pengujian stabilitas dan keandalan sistem.

d. Pengukuran dan Pencatatan System selama pengujian : Pada tahap ini, data yang terkumpul dari seluruh proses pengujian akan dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem yang diusulkan. Mengumpulkan data dari berbagai sumber :

- Sensor dan kamera
- Data logging system

Analisis ini juga akan membandingkan sistem baru dengan sistem konvensional yang sudah ada. Hasil dari analisis ini akan menjadi dasar untuk melakukan perbaikan dan penyempurnaan pada prototipe sistem.

3.8 Metode Analisis Hasil dan Pembahasan

Tahap ini mencakup analisis data yang diperoleh dari seluruh proses pengujian. Hasil analisis ini akan digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem dan membandingkannya dengan sistem konvensional. Berdasarkan temuan yang ada, perbaikan dan penyempurnaan pada prototipe akan dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat menunjukkan bahwa implementasi sistem interlock berbasis AI dapat menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan produktif, sejalan dengan tuntutan industri 4.0, pada analisis ini akan dibagi menjadi beberapa point analisis yang dilakukan oleh penulis sebagai berikut :

a. Efektifitas Interlock : Evaluasi ini akan menilai seberapa baik sistem interlock cerdas dalam menghentikan proses secara otomatis ketika kondisi tidak aman terdeteksi, serta kontribusinya dalam menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman.

b. Presentasi kegagalan (error rate) : Analisis akan mencakup persentase kesalahan yang terjadi pada sistem, khususnya terkait deteksi objek oleh AI dan pemicuan fungsi interlock. Tingkat akurasi deteksi yang tinggi dan waktu respon yang cepat adalah indikator keberhasilan.

c. Kemungkinan kesalahan logic control : Pembahasan ini akan mengidentifikasi dan menganalisis potensi kesalahan dalam logika pemrograman PLC Schneider TM221CE40R yang mengendalikan sistem interlock. Validasi logika kerja sistem akan dilakukan melalui black box testing.

d. Evaluasi terhadap standard keselamatan : Sistem akan dievaluasi berdasarkan kepatuhannya terhadap standar keselamatan industri internasional seperti IEC 60204-1, ISO 13849-1, dan OSHA 1910 Subpart O. Penerapan standar ini penting untuk memastikan desain sistem memenuhi aspek legal dan kepatuhan keselamatan

3.9 Hipotesis Penelitian

Tahap ini mencakup interpretasi temuan dari analisis data kuantitatif dan kualitatif. Pembahasan akan berpusat pada efektivitas sistem interlock cerdas dalam meningkatkan keamanan dan efisiensi pengujian. Selain itu, keterbatasan penelitian akan diidentifikasi, dan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya serta pengembangan sistem akan diberikan. Poin-poin spesifik dalam hipotesis penelitian meliputi:

- a. **Menginterpretasikan temuan dari analisi data kuantitatif dan kualitatif :** Mengolah dan menjelaskan hasil numerik dari pengujian (misalnya, *error rate*, *response time*) dan data non-numerik dari survei atau *feedback* pengguna.
- b. **Membahas efektivitas sistem interlock cerdas dalam meningkatkan keamanan dan efisiensi pengujian :** Menguraikan bagaimana integrasi AI (YOLOv5) dengan sensor (tekanan, *limit switch*, *door lock*) dan kontrol PLC Schneider mampu secara proaktif mengurangi risiko kecelakaan dan mengoptimalkan proses operasional dibandingkan dengan sistem konvensional
- c. **Mengidentifikasi keterbatasan penelitian dan memberikan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya dan pengembangan sistem :** Menjelaskan batasan-batasan dalam ruang lingkup penelitian, seperti fokus pada sistem kamera vision AI dan lokasi uji coba yang terbatas. Memberikan saran untuk pengembangan di masa depan, termasuk kemungkinan integrasi dengan sistem kontrol pabrik yang lebih kompleks.
- d. **Penyesuaian sistem :**
 - **Optimalisasi hardware dan software :** Melakukan penyesuaian untuk meningkatkan kinerja komponen fisik dan program sistem.
 - **Finalisasi design system :** Memastikan bahwa desain akhir sistem interlock cerdas memenuhi semua tujuan penelitian dan persyaratan keselamatan.
 - **Pengembangan lanjutan :** Merencanakan langkah-langkah untuk pengembangan dan peningkatan sistem di masa depan berdasarkan hasil dan rekomendasi.

BAB 4 PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

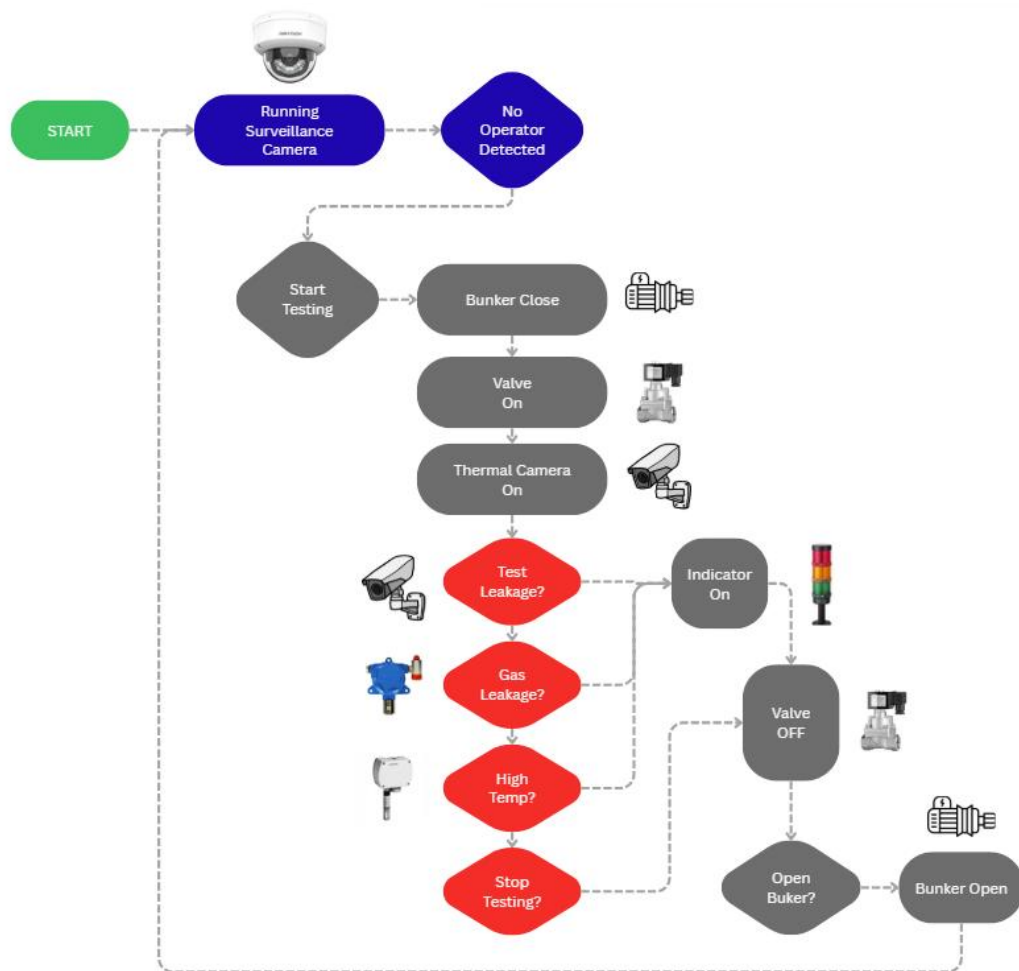
4.1 Perancangan sistem

Sistem ini mendeteksi keberadaan manusia di zona tertentu (area pintu) menggunakan kamera CCTV Hikvision (RTSP), diproses secara real-time oleh Jetson Nano P3450 menggunakan model YOLOv5n (dioptimasi dengan TensorRT). Hasil deteksi dikirim ke PLC Schneider M221 melalui protokol Modbus TCP untuk memicu aksi fisik (misalnya menyalakan lampu indikator dan buzzer), dan video stream (dengan overlay bounding box) dapat dilihat langsung melalui browser di jaringan yang sama dengan Jetson.

4.1.1 Konsep Kerja

Konsep kerja Safety Interlock System dirancang berdasarkan prinsip closed-loop industrial safety system, di mana proses pemantauan, analisis, pengambilan keputusan, dan pengendalian berlangsung secara berkesinambungan selama proses pressure test. Sistem tidak hanya mengumpulkan data dari berbagai sensor, tetapi juga melakukan evaluasi terhadap kondisi lingkungan secara real-time untuk memastikan bahwa seluruh persyaratan keselamatan telah terpenuhi sebelum proses pengujian dimulai maupun selama proses berlangsung. Pada tahap awal, sistem melakukan inisialisasi seluruh perangkat yang terdiri atas surveillance camera, thermal inspection camera, sensor tekanan, sensor temperatur, sensor gas, sensor status pintu, PLC, dan HMI. Setelah seluruh perangkat berada dalam kondisi siap, kamera pengawas mulai memperoleh citra visual area pressure test, sedangkan kamera termal melakukan akuisisi citra inframerah untuk memantau distribusi temperatur pada area pengujian. Secara bersamaan, sensor-sensor industri membaca parameter proses secara kontinu. Data visual yang diperoleh dari surveillance camera diproses menggunakan algoritma Computer Vision untuk mendeteksi keberadaan manusia atau objek pada area berbahaya. Sementara itu, data dari thermal inspection camera dianalisis untuk mengidentifikasi perubahan temperatur, hot spot, atau indikasi kebocoran. Seluruh hasil analisis tersebut kemudian digabungkan dengan data dari sensor proses dan dikirimkan menuju PLC. PLC berfungsi sebagai pusat pengambilan keputusan (Decision Controller) yang menjalankan logika Safety Interlock. Apabila seluruh parameter menunjukkan kondisi aman, PLC akan memberikan izin untuk memulai atau melanjutkan proses pressure test. Sebaliknya, apabila terdeteksi kondisi yang berpotensi membahayakan, seperti keberadaan operator di area pengujian, kenaikan temperatur yang tidak normal, tekanan melebihi batas aman, atau kegagalan komunikasi perangkat, PLC akan mengaktifkan mekanisme Emergency Shutdown, menghentikan proses pengujian, serta mengaktifkan alarm dan indikator

keselamatan. Seluruh kondisi operasional sistem ditampilkan secara real-time melalui Human Machine Interface (HMI) sehingga operator dapat memantau status sistem secara menyeluruh, termasuk kondisi kamera, sensor, alarm, dan proses pressure test.



Gambar 4.1 Konsep Kerja Sistem Interlock

4.1.2 Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang dirancang pada penelitian ini mengadopsi pendekatan Industrial Cyber-Physical System (CPS), yaitu sistem yang mengintegrasikan perangkat fisik (physical layer) dengan sistem komputasi (computational layer) dan sistem kendali (control layer) dalam satu platform keselamatan terpadu.

1. Sensing Layer

Lapisan ini berfungsi sebagai unit akuisisi data yang terdiri atas surveillance camera, thermal inspection camera, sensor tekanan, sensor temperatur, sensor gas, dan sensor status pintu. Seluruh perangkat pada lapisan ini bertugas memperoleh informasi kondisi area dan parameter proses secara real-time.

2. Processing Layer

Data visual dan termal diproses oleh komputer industri yang menjalankan algoritma Computer Vision untuk mendeteksi keberadaan manusia, menganalisis distribusi temperatur, serta melakukan Vision Sensor Fusion. Hasil analisis dikonversi menjadi informasi yang dapat digunakan oleh sistem kendali.

3. Control Layer

Lapisan ini terdiri atas Programmable Logic Controller (PLC) yang berfungsi sebagai pusat pengambilan keputusan. PLC menerima seluruh data hasil analisis dari Processing Layer dan menjalankan logika Safety Interlock untuk menentukan kondisi aman atau tidak aman.

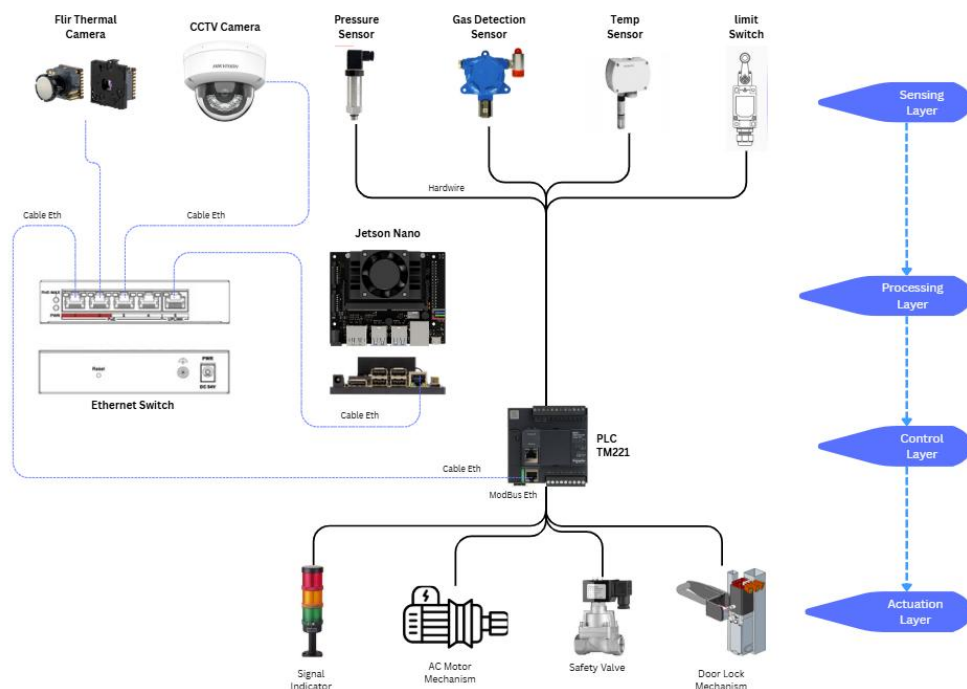
4. Actuation Layer

Berdasarkan keputusan PLC, lapisan ini mengendalikan berbagai aktuator seperti door lock, solenoid valve, alarm, dan indikator visual untuk melaksanakan tindakan keselamatan yang diperlukan.

5. Monitoring Layer

Lapisan ini terdiri atas Human Machine Interface (HMI) yang menyajikan informasi operasional sistem secara real-time, termasuk tampilan kamera, status sensor, alarm, serta parameter pressure test.

Pendekatan berlapis ini memudahkan integrasi sistem, meningkatkan modularitas, serta mempermudah proses pengembangan dan pemeliharaan di masa mendatang.



Gambar 4.2 Konsep Kerja Sistem Interlock

4.1.3 Block Diagram Sistem

Untuk menggambarkan hubungan antar komponen secara menyeluruh, sistem direpresentasikan dalam bentuk block diagram yang menunjukkan aliran informasi mulai dari proses akuisisi data hingga pengendalian aktuator. Secara umum, blok diagram sistem terdiri atas lima blok utama, yaitu:

- **Input Block**, terdiri atas *surveillance camera*, *thermal inspection camera*, sensor tekanan, sensor temperatur, sensor gas, dan sensor status pintu sebagai sumber data utama.
- **Processing Block**, berupa komputer industri yang menjalankan algoritma *Computer Vision* dan *Vision Sensor Fusion*.
- **Control Block**, berupa PLC yang memproses seluruh informasi untuk menjalankan logika *Safety Interlock*.
- **Output Block**, terdiri atas *door lock*, *solenoid valve*, alarm, dan indikator visual sebagai aktuator sistem.
- **Monitoring Block**, berupa HMI yang menampilkan status seluruh komponen dan proses *pressure test* secara real-time.

Diagram blok ini memberikan gambaran umum mengenai hubungan fungsional antar subsistem sebelum dibahas lebih rinci pada tahap implementasi.

4.1.4 Data Flow

Aliran data (Data Flow) pada sistem dimulai dari proses akuisisi informasi oleh seluruh perangkat input. Kamera pengawas menghasilkan video stream yang diproses menggunakan algoritma *Computer Vision*, sedangkan kamera termal menghasilkan citra inframerah untuk analisis distribusi temperatur. Sensor tekanan, temperatur, gas, dan status pintu secara kontinu mengirimkan data numerik kepada sistem.

Seluruh data kemudian diproses pada *Processing Layer* untuk menghasilkan informasi berupa status keberadaan manusia, kondisi termal, nilai tekanan, status pintu, dan parameter keselamatan lainnya. Informasi tersebut diteruskan menuju PLC sebagai dasar pengambilan keputusan.

Setelah PLC mengevaluasi seluruh parameter menggunakan logika *Safety Interlock*, hasil keputusan dikirimkan menuju aktuator dan HMI. Aktuator menjalankan tindakan keselamatan sesuai kondisi sistem, sedangkan HMI memperbarui tampilan informasi secara real-time sehingga operator memperoleh kondisi operasional terkini.

Dengan alur tersebut, sistem membentuk siklus pengendalian tertutup (*closed-loop control*) yang mampu merespons perubahan kondisi secara cepat dan otomatis.

4.2 Implementasi Hardware

Seluruh perangkat keras diintegrasikan menjadi satu sistem yang terdiri atas unit pengambilan data (*data acquisition*), unit pemrosesan (*processing unit*), unit

pengendali (control unit), serta unit keluaran (output device). Implementasi dilakukan dengan mempertimbangkan aspek keandalan, kompatibilitas komunikasi, kemudahan pemeliharaan, serta kemampuan sistem untuk bekerja secara real-time di lingkungan industri. Antarmuka Pengguna (Mobile Android)



Gambar 4.3 Instalasi PLC di dalam Panel

4.2.1 Implementasi Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) berfungsi sebagai pusat kendali (main controller) pada sistem Safety Interlock. PLC bertugas menerima seluruh data yang berasal dari modul Computer Vision, kamera termal, serta sensor-sensor industri, kemudian menjalankan logika Safety Interlock untuk menentukan tindakan pengendalian terhadap proses pressure test.

Pada implementasi penelitian ini, PLC dihubungkan dengan komputer industri melalui protokol komunikasi industri sehingga mampu menerima status hasil analisis Computer Vision secara real-time. Selain itu, PLC juga terhubung dengan sensor tekanan, sensor temperatur, sensor gas, sensor status pintu, alarm, door lock, dan aktuator lainnya melalui modul Digital Input (DI), Digital Output (DO), Analog Input (AI), dan Analog Output (AO).

Implementasi PLC dilakukan dengan memperhatikan prinsip fail-safe, yaitu setiap kegagalan komunikasi atau kondisi abnormal akan menghasilkan status interlock aktif, sehingga proses pressure test dihentikan secara otomatis untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja.

4.2.2 Implementasi embedded PC

Pada pengujian kali ini, digunakan Jetson nano untuk implementasi embedded PC dengan instalasi sebagai berikut.



Gambar 4.4 Instalasi embedded PC

4.2.3 Implementasi Surveillance Camera

Surveillance Camera diimplementasikan sebagai perangkat utama untuk melakukan pemantauan visual terhadap area pressure test. Kamera dipasang pada posisi yang memiliki cakupan pandang (Field of View) optimal sehingga seluruh area pengujian dapat dipantau tanpa adanya blind spot. Kamera menghasilkan video stream beresolusi tinggi yang dikirimkan menuju komputer industri melalui jaringan Ethernet. Selanjutnya, data video diproses menggunakan algoritma Computer Vision untuk melakukan deteksi manusia (Human Detection), identifikasi objek, serta verifikasi kondisi area sebelum proses pressure test dimulai. Penempatan kamera juga mempertimbangkan faktor pencahayaan, ketinggian pemasangan, sudut kemiringan (camera angle), dan jarak deteksi agar sistem mampu menghasilkan tingkat akurasi deteksi yang tinggi.



Gambar 4.5 Instalasi Surveillance Camera

Perancangan antarmuka ini memungkinkan sistem melakukan verifikasi otomatis terhadap kondisi area sebelum proses pressure test dimulai maupun selama proses berlangsung. Dengan demikian, keberadaan operator pada zona berbahaya dapat dideteksi tanpa memerlukan inspeksi visual secara manual sehingga meningkatkan tingkat keselamatan operasional.

Output Interface:

- Video Stream
- Human Detection Status
- Bounding Box Coordinate
- Confidence Score
- Object Classification
- Gambar yang disarankan:
- Interface Surveillance Camera
- Camera Position Layout
- Camera Coverage Area

4.2.4 Implementasi Thermal Camera

Thermal Inspection Camera digunakan sebagai perangkat inspeksi temperatur tanpa kontak yang berfungsi mendeteksi distribusi panas pada area pressure test. Kamera dipasang menghadap objek pengujian sehingga mampu menangkap perubahan temperatur yang terjadi selama proses berlangsung. Data termal yang diperoleh dikirimkan menuju komputer industri untuk dianalisis menggunakan perangkat lunak termografi. Sistem kemudian menghasilkan informasi berupa temperatur maksimum, temperatur rata-rata, serta lokasi hot spot yang digunakan

sebagai salah satu parameter dalam proses Safety Interlock. Implementasi kamera termal memberikan kemampuan tambahan bagi sistem untuk mendeteksi kondisi abnormal yang tidak dapat diamati menggunakan kamera visual konvensional.

- Thermal Camera Installation
- Thermal Monitoring
- Thermal Image

4.2.5 Implementasi Sensor

Untuk memperoleh informasi kondisi proses secara real-time, sistem dilengkapi dengan beberapa sensor industri yang bekerja secara simultan. Sensor-sensor tersebut berfungsi sebagai sumber data utama bagi PLC dalam melakukan evaluasi keselamatan. Sensor tekanan digunakan untuk memantau nilai tekanan selama proses pressure test, sensor temperatur digunakan untuk mengukur temperatur media uji, sensor gas digunakan untuk mendeteksi indikasi kebocoran, sedangkan sensor status pintu digunakan untuk memastikan area pengujian telah tertutup sebelum proses dimulai. Seluruh sensor dihubungkan langsung menuju PLC sehingga data dapat dibaca secara kontinu selama sistem beroperasi.

Gambar yang disarankan

- Sensor Installation
- Sensor Wiring

4.2.6 Implementasi Door Lock dan Actuator

Door Lock merupakan salah satu aktuator utama yang berfungsi mengendalikan akses menuju area pressure test. Door Lock dikendalikan langsung oleh PLC berdasarkan hasil evaluasi logika Safety Interlock. Apabila seluruh parameter keselamatan terpenuhi, pintu akan tetap terkunci selama proses pressure test berlangsung untuk mencegah operator memasuki area berbahaya. Sebaliknya, setelah proses selesai dan sistem dinyatakan aman, PLC akan memberikan sinyal untuk membuka kunci pintu secara otomatis. Selain door lock, aktuator lain yang digunakan meliputi solenoid valve, indikator visual, dan relay keselamatan yang dikendalikan sesuai kondisi sistem.

4.2.7 Implementasi Alarm System

Alarm System berfungsi memberikan peringatan kepada operator ketika sistem mendeteksi kondisi yang tidak memenuhi persyaratan keselamatan. Alarm terdiri atas indikator suara (Buzzer) dan indikator visual (Beacon Lamp) yang dikendalikan langsung oleh PLC. Alarm akan aktif apabila terjadi salah satu kondisi berikut:

- Operator berada pada area pressure test.
- Tekanan melebihi batas aman.
- Temperatur abnormal.
- Kebocoran gas.
- Emergency Stop ditekan.
- Gangguan komunikasi sistem.

Implementasi alarm dirancang mengikuti prinsip fail-safe, sehingga alarm tetap aktif apabila terjadi kegagalan sistem yang berpotensi membahayakan keselamatan.

4.2.8 Wiring Diagram

Implementasi sistem diwujudkan dalam bentuk wiring diagram yang menggambarkan hubungan kelistrikan dan komunikasi antar seluruh perangkat. Diagram ini menunjukkan koneksi antara:

- PLC
- Computer Vision PC
- Surveillance Camera
- Thermal Camera
- Sensor
- Alarm
- Door Lock
- Solenoid Valve
- HMI

Wiring diagram disusun menggunakan standar pengkabelan industri untuk memastikan sistem mudah dipasang, dipelihara, serta dikembangkan.

4.3 Implementasi Computer Vision (YOLO)

Modul Computer Vision merupakan komponen utama dalam sistem yang bertugas melakukan deteksi keberadaan manusia pada area pressure test. Implementasi dilakukan menggunakan algoritma You Only Look Once (YOLO) karena memiliki kemampuan melakukan deteksi objek secara real-time dengan tingkat akurasi yang tinggi dan waktu inferensi yang rendah. Video yang diperoleh dari Surveillance Camera diproses menjadi rangkaian frame yang kemudian dianalisis oleh model YOLO. Setiap frame dipindai untuk mengidentifikasi objek manusia, menentukan posisi objek melalui bounding box, serta menghitung tingkat kepercayaan (confidence score) terhadap hasil deteksi. Informasi tersebut kemudian

dikonversi menjadi status logika yang digunakan sebagai salah satu parameter dalam sistem Safety Interlock. Untuk meningkatkan keandalan sistem, diterapkan mekanisme Region of Interest (ROI) sehingga proses deteksi hanya dilakukan pada area yang telah ditetapkan sebagai zona pressure test. Pendekatan ini mampu mengurangi kesalahan deteksi (false detection) akibat adanya objek di luar area pengujian.

Berikut perintah instalasi dan konfigurasi untuk menyiapkan environment computer vision (YOLOv5 dengan akselerasi TensorRT) di Jetson Nano P3450, sampai pada titik model dapat dijalankan dan berhasil melakukan deteksi objek secara real-time dari kamera RTSP. Setiap perintah disertai penjelasan fungsinya.

Tabel 4.1 Spesifikasi Computer Vision

Komponen	Versi/Detail
Perangkat	Jetson Nano P3450
Sistem Operasi	Ubuntu 18.04 (JetPack 4.6.x)
CUDA	10.2
TensorRT	8.2 (bawaan JetPack)
Python	3.6
PyTorch	1.10.0 (build khusus Jetson)
YOLOv5	v6.2

4.3.1 Persiapan Dasar Sistem

- **Tambah Swap Memory**

```
sudo systemctl disable nvzramconfig
sudo fallocate -l 6G /mnt/swapfile
sudo chmod 600 /mnt/swapfile
sudo mkswap /mnt/swapfile
sudo swapon /mnt/swapfile
echo '/mnt/swapfile swap swap defaults 0 0' | sudo tee -a /etc/fstab
```

Pengertian: RAM Jetson Nano hanya 4GB dan dipakai bersama oleh CPU dan GPU (shared memory). Proses instalasi dan kompilasi package besar (PyTorch, ONNX, dll) membutuhkan lebih banyak memori dari yang tersedia. Swap memory menggunakan sebagian ruang penyimpanan (disk) sebagai "RAM tambahan" darurat, mencegah proses gagal atau sistem hang karena kehabisan memori. Baris terakhir memastikan swap ini otomatis aktif lagi setiap kali perangkat di-restart

- **Aktifkan Mode Performa Maksimal**

```
sudo nvpmode -m 0
sudo jetson_clocks
```

Pengertian: Jetson Nano punya beberapa mode daya untuk menghemat listrik, yang membatasi jumlah core CPU/GPU aktif dan kecepatan clock-nya. `nvpmode -m 0` mengaktifkan mode performa penuh (MAXN) — semua core aktif. `jetson_clocks` mengunci kecepatan clock CPU/GPU di titik maksimal, mencegah sistem menurunkan performa otomatis (throttling) saat idle sesaat.

- **Buat Virtual Environment Python**

```
python3 -m venv ~/cv-env --system-site-packages
source ~/cv-env/bin/activate
```

Pengertian: Virtual environment mengisolasi package Python proyek ini dari instalasi Python sistem, mencegah konflik versi dengan program lain. Opsi `--system-site-packages` WAJIB di sini — tanpa ini, virtual environment tidak akan bisa mengakses TensorRT Python binding yang sudah terpasang di level sistem oleh JetPack (TensorRT tidak bisa diinstal ulang lewat pip biasa).

4.3.2 OpenCV dan Perbaikan Kompatibilitas NumPy

- **Hapus OpenCV versi konflik**

```
pip uninstall opencv-python opencv-python-headless -y
```

Pengertian: JetPack sudah menyediakan OpenCV bawaan sistem yang sudah dilengkapi dukungan GStreamer (dibutuhkan untuk membaca video RTSP dari kamera). Package `opencv-python` dari PyPI (yang sering terinstall otomatis sebagai dependency library lain) TIDAK punya dukungan GStreamer, dan akan menimpa OpenCV bawaan sistem karena urutan pemuatan Python. Uninstall versi pip ini supaya versi bawaan JetPack yang dipakai.

```
python3 -c "import cv2; print(cv2.getBuildInformation())" | grep -i
gstreamer
```

Output yang berhasil:

```
GStreamer: YES (1.14.5)
```

Catatan: Kalau hasilnya "NO" atau muncul error import, artinya opencv-python dari pip masih terpasang dan perlu dihapus dulu.

- **Perbaikan Kompatibilitas NumPy/OpenBLAS**

Masalah: `import numpy` atau `import cv2` bisa menyebabkan crash "Illegal instruction (core dumped)" di Jetson Nano. Penyebabnya, library matematika OpenBLAS yang dipakai numpy salah mendeteksi tipe CPU ARM Cortex-A57 milik Jetson Nano, lalu mencoba menjalankan instruksi CPU yang tidak didukung.

```
echo 'export OPENBLAS_CORETYPE=ARMV8' >> ~/.bashrc
```

```
source ~/.bashrc
```

Pengertian: baris ini memaksa OpenBLAS memakai kernel optimasi generik untuk arsitektur ARMv8, bukan hasil auto-deteksi yang keliru.

Perintah `source ~/.bashrc` menerapkan perubahan itu langsung ke sesi terminal yang sedang aktif tanpa perlu logout/login ulang.

```
python3 -c "import numpy; import cv2; print('OK')"
```

Output yang berhasil:

```
OK
```

Catatan: Environment variable ini WAJIB ada di setiap tempat program dijalankan — termasuk kalau nanti dijadikan systemd service, karena service tidak membaca ~/.bashrc secara otomatis.

4.3.3 Instalasi PyTorch

- **Install PyTorch Build Khusus Jetson**

```
wget
```

```
https://nvidia.box.com/shared/static/fjtbno0vpo676a25cgvuqc1wty0fkkg6.
```

```
whl -O torch-1.10.0-cp36-cp36m-linux_aarch64.whl
```

```
pip install torch-1.10.0-cp36-cp36m-linux_aarch64.whl
```

Pengertian: PyTorch dari pip install torch biasa dibuild untuk CPU/GPU x86, TIDAK kompatibel dengan arsitektur ARM64 dan CUDA milik Jetson. NVIDIA menyediakan wheel (file instalasi Python) khusus yang sudah dibuild untuk kombinasi ARM64+CUDA Jetson — wheel inilah yang dipakai di sini.

- **Install torchvision (Build dari Source)**

```
sudo apt install -y libjpeg-dev zlib1g-dev libpython3-dev libavcodec-dev  
libavformat-dev libswscale-dev
```

```
git clone --branch v0.11.1 https://github.com/pytorch/vision torchvision  
cd torchvision && python3 setup.py install --user
```

Pengertian: torchvision (library pendukung PyTorch untuk pengolahan gambar) tidak tersedia sebagai wheel terpisah untuk Jetson, sehingga perlu dibuild langsung dari source code.

Paket apt di baris pertama adalah dependency sistem (library C/C++) yang dibutuhkan proses build tersebut.

Versi v0.11.1 dipilih karena kompatibel dengan PyTorch 1.10.0.

```
python3 -c "import torch; print(torch.__version__,  
torch.cuda.is_available())"
```

Output yang berhasil:

```
1.10.0 True
```

Angka "1.10.0" mengonfirmasi versi PyTorch terpasang benar, dan "True" mengonfirmasi PyTorch berhasil mendeteksi dan bisa memakai GPU (CUDA) Jetson.

4.3.4 Instalasi YOLOv5

- **Clone Repository YOLOv5**

```
git clone https://github.com/ultralytics/yolov5.git
cd yolov5
git checkout v6.2
```

Pengertian: mengunduh source code resmi YOLOv5 dari GitHub.

Versi v6.2 dipilih secara spesifik (bukan versi terbaru) karena kompatibel dengan PyTorch 1.10 dan Python 3.6 yang terpasang di Jetson — versi YOLOv5 yang lebih baru membutuhkan Python/PyTorch versi lebih baru yang tidak tersedia untuk JetPack 4.6.

- **Download Model Pretrained**

```
wget
https://github.com/ultralytics/yolov5/releases/download/v6.2/yolov5n.pt
```

Pengertian: mengunduh bobot (weights) model YOLOv5n yang sudah dilatih sebelumnya (pretrained) menggunakan dataset COCO (80 kategori objek umum, termasuk "person"). Model "n" (nano) adalah varian paling ringan/kecil dari keluarga YOLOv5, paling sesuai untuk perangkat terbatas seperti Jetson Nano.

- **Install Dependency YOLOv5**

```
grep -v -E "^torch|^torchvision|^opencv" requirements.txt >
requirements_filtered.txt
pip install -r requirements_filtered.txt
```

Pengertian: requirements.txt bawaan YOLOv5 mencantumkan versi umum dari torch, torchvision, dan opencv-python — kalau diinstal langsung, akan MENIMPA versi khusus Jetson yang sudah dipasang di Bagian 2 dan 3. Baris pertama membuat salinan requirements.txt tanpa ketiga baris itu, baru diinstal. Dependency lain (matplotlib, pandas, tqdm, dll) tetap terinstal normal karena dibutuhkan berbagai fungsi utilitas YOLOv5.

```
python3 -c "import torch; print(torch.__version__,
torch.cuda.is_available())"
python3 -c "import cv2; print(cv2.getBuildInformation())" | grep -i
gstreamer
```

Jalankan ulang kedua verifikasi ini untuk memastikan instalasi dependency di atas tidak menimpa PyTorch/OpenCV yang sudah benar — hasilnya harus tetap sama seperti sebelumnya ("1.10.0 True" dan "GStreamer: YES").

4.3.5 Koneksi Jaringan ke Kamera

- **Set IP Static untuk Koneksi Kamera**

```
sudo nmcli con mod "Wired connection 1" ipv4.addresses 172.16.10.10/24
sudo nmcli con mod "Wired connection 1" ipv4.gateway ""
Sudo nmcli con mod "Wired connection 1" ipv4.method manual
sudo nmcli con up "Wired connection 1"
```

Pengertian: kamera CCTV terhubung ke Jetson melalui kabel Ethernet (interface eth0) ke sebuah switch khusus, terpisah dari jaringan WiFi. Perintah ini memberi IP tetap (static) 172.16.10.10 ke interface eth0 supaya berada di subnet jaringan yang sama dengan kamera. Gateway sengaja dikosongkan karena jaringan ini murni untuk komunikasi lokal ke kamera, bukan jalur akses internet.

```
ping -c 4 172.16.10.20
```

Output yang berhasil (contoh):

```
PING 172.16.10.20 (172.16.10.20) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 172.16.10.20: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.7 ms
...
4 packets transmitted, 4 received, 0% packet loss
```

0% packet loss mengonfirmasi Jetson berhasil menjangkau kamera (di contoh ini, kamera berada di IP 172.16.10.20) melalui jaringan.

- **Verifikasi Koneksi RTSP**

```
gst-launch-1.0 rtspsrc
location="rtsp://admin:<password>@172.16.10.20:554/Streaming/Channels/102" latency=0 protocols=tcp name=src src. ! queue ! rtph264depay !
h264parse ! avdec_h264 ! videoconvert ! fakesink src. ! fakesink
```

Pengertian: perintah ini menguji apakah stream video RTSP dari kamera Hikvision bisa diambil dan di-decode dengan benar, memakai GStreamer secara langsung (di luar Python) untuk isolasi masalah jaringan/kredensial. protocols=tcp dipilih karena lebih stabil dibanding UDP untuk jaringan lokal. fakesink berarti video diproses tapi tidak ditampilkan — cukup untuk menguji apakah datanya bisa diterima tanpa error.

Output yang berhasil:

```
Setting pipeline to PLAYING ...
...
Got EOS from element "pipeline0".
Execution ended after 0:00:29.xxx
```

Pipeline berjalan tanpa baris ERROR sampai akhirnya berhenti dengan Got EOS (End of Stream, sinyal normal dari kamera, bukan error) mengonfirmasi RTSP berhasil diakses.

- **Verifikasi RTSP via Python/OpenCV**

```
cat > ~/test_rtsp.py << 'EOF'
import cv2, time
RTSP_URL =
"rtsp://admin:<password>@172.16.10.20:554/Streaming/Channels/102"
pipeline = f"rtspsrc location={RTSP_URL} latency=0 protocols=tcp !
rtph264depay ! h264parse ! avdec_h264 ! videoconvert ! appsink drop=1"
cap = cv2.VideoCapture(pipeline, cv2.CAP_GSTREAMER)
if not cap.isOpened():
    print("GAGAL"); exit(1)
count = 0; start = time.time()
while count < 30:
    ret, frame = cap.read()
    if not ret: break
    count += 1
elapsed = time.time() - start
print(f"Baca {count} frame dalam {elapsed:.2f}s (~{count/elapsed:.1f}
FPS)")
cap.release()
EOF
python3 ~/test_rtsp.py
```

Pengertian: script ini membuka koneksi RTSP dengan cara yang SAMA seperti akan dipakai program utama (lewat OpenCV, bukan gst-launch langsung), membaca 30 frame berturut-turut, lalu menghitung kecepatan baca rata-rata (FPS mentah, belum termasuk beban inference AI).

Output yang berhasil (contoh):

Baca 30 frame dalam 1.96s (~15.3 FPS)

4.3.6 Konversi Model ke TensorRT

- **Setup Build Tools**

```
sudo apt install -y protobuf-compiler libprotobuf-dev
pip install "setuptools==58.2.0" wheel --no-deps
```

Pengertian: protobuf-compiler dibutuhkan untuk mem-build package onnx dari source code. setuptools di-pin ke versi 58.2.0 karena versi pip yang terpasang di Jetson (21.3.1, sudah cukup lama) tidak kompatibel dengan setuptools versi terbaru — kombinasi yang salah menyebabkan berbagai proses instalasi Python gagal.

- **Install ONNX**

```
pip install onnx==1.10.1 --no-deps
```

Pengertian: ONNX adalah format model universal yang jadi jembatan/perantara antara PyTorch dan TensorRT. Versi 1.10.1 dipilih

secara spesifik karena punya prebuilt wheel untuk arsitektur ARM64 — versi ONNX yang lebih baru cuma tersedia sebagai source code yang harus di-compile sendiri, dan proses compile itu gagal di Jetson karena masalah kompatibilitas build tools.

```
python3 -c "import onnx; print(onnx.__version__)"
```

Output yang berhasil:

1.10.1

- **Export Model: PyTorch ke ONNX**

```
cd ~/yolov5
```

```
python3 export.py --weights yolov5n.pt --img 640 --batch 1 --include onnx  
--opset 12
```

Pengertian: mengonversi model dari format PyTorch (.pt) ke format ONNX (.onnx).

--img 640 menentukan resolusi input model. --opset 12 menentukan versi standar operasi ONNX yang dipakai — dipilih karena paling kompatibel dengan TensorRT 8.2 (bawaan JetPack 4.6 Jetson ini).

```
ls -la yolov5n.onnx
```

Output yang berhasil (contoh):

```
-rw-rw-r-- 1 luki luki 7897041 ... yolov5n.onnx
```

Munculnya file yolov5n.onnx dengan ukuran wajar (sekitar 7-8MB untuk model nano) mengonfirmasi proses export berhasil.

- **Convert ONNX ke TensorRT Engine**

```
/usr/src/tensorrt/bin/trtexec --onnx=yolov5n.onnx --  
saveEngine=yolov5n.engine --workspace=2048 --fp16
```

Pengertian: trtexec adalah tool bawaan TensorRT (sudah terpasang otomatis lewat JetPack, tidak perlu instalasi terpisah) untuk mengonversi model ONNX menjadi TensorRT engine (.engine) — format yang paling dioptimasi untuk berjalan cepat di GPU Jetson.

--fp16 memaksa precision 16-bit (bukan 32-bit default), memberi speedup signifikan di GPU Maxwell Jetson Nano dengan sedikit sekali kehilangan akurasi. --workspace=2048 membatasi memori kerja (dalam MB) yang boleh dipakai proses konversi, mencegah kehabisan RAM. Proses ini memakan waktu 5-15 menit.

```
ls -la yolov5n.engine
```

Output yang berhasil (contoh):

```
-rw-rw-r-- 1 luki luki 7759720 ... yolov5n.engine
```

4.3.7 Menjalankan Inference (Computer Vision Aktif)

- **Install pycuda**

```
export CUDA_INC_DIR=/usr/local/cuda/include
export CPATH=/usr/local/cuda/include:$CPATH
export PATH=/usr/local/cuda/bin:$PATH
export
LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/cuda/lib64:$LD_LIBRARY_PATH
pip install pycuda --no-deps --no-build-isolation
```

Pengertian: pycuda dibutuhkan untuk menjalankan TensorRT engine dari kode Python — mengelola alokasi memori GPU secara manual saat inference.

Empat baris export mengarahkan compiler ke lokasi header CUDA (cuda.h) yang dibutuhkan saat proses build pycuda.

--no-build-isolation wajib disertakan — tanpa ini, pip akan mencoba membangun ulang numpy di lingkungan terisolasi kosong (yang gagal), padahal numpy yang sudah terpasang sebelumnya sudah cukup dan seharusnya dipakai langsung.

```
python3 -c "import pycuda.driver as cuda; import pycuda.autoinit;
print('OK')"
```

Output yang berhasil:

```
OK
```

- **Buat Wrapper TensorRT Engine (trt_infer.py)**

File ini membungkus proses loading engine dan menjalankan inference, dipakai oleh program utama:

```
import numpy as np

import tensorrt as trt

import pycuda.driver as cuda
import pycuda.autoinit

TRT_LOGGER = trt.Logger(trt.Logger.WARNING)

class TRTEngine:

    def __init__(self, engine_path):
```

```

    with open(engine_path, "rb") as f, trt.Runtime(TRT_LOGGER) as
runtime:

    self.engine = runtime.deserialize_cuda_engine(f.read())

    self.context = self.engine.create_execution_context()

    self.inputs, self.outputs, self.bindings = [], [], []

    self.stream = cuda.Stream()

    for binding in self.engine:

        shape = self.engine.get_binding_shape(binding)

        size = trt.volume(shape)

        dtype = trt.nptype(self.engine.get_binding_dtype(binding))

        host_mem = cuda.pagelocked_empty(size, dtype)

        device_mem = cuda.mem_alloc(host_mem.nbytes)

        self.bindings.append(int(device_mem))

        if self.engine.binding_is_input(binding):

            self.inputs.append({"host": host_mem, "device": device_mem,
"shape": shape})

        else:

            self.outputs.append({"host": host_mem, "device": device_mem,
"shape": shape})

    def infer(self, input_data):

        np.copyto(self.inputs[0]["host"], input_data.ravel())

        cuda.memcpy_htod_async(self.inputs[0]["device"],
self.inputs[0]["host"], self.stream)

        self.context.execute_async_v2(bindings=self.bindings,
stream_handle=self.stream.handle)

        for out in self.outputs:

            cuda.memcpy_dtoh_async(out["host"], out["device"], self.stream)

        self.stream.synchronize()

        return [out["host"].reshape(out["shape"]) for out in self.outputs]

```

Penjelasan:

- `init__()`: membaca file `.engine`, deserialize jadi objek CUDA engine, siapkan execution context, dan alokasikan memory CPU+GPU untuk tiap input/output model — dilakukan sekali di awal supaya inference berikutnya lebih cepat
- `infer()`: dipanggil setiap frame — copy data gambar ke GPU, jalankan model, copy hasil balik ke CPU, kembalikan hasilnya
- **Verifikasi Shape Model (`check_engine.py`)**

```
cat > check_engine.py << 'EOF'

from trt_infer import TRTEngine

engine = TRTEngine("yolov5n.engine")

print("=== INPUT ===")

for inp in engine.inputs:

    print("shape:", inp["shape"])

print("=== OUTPUT ===")

for out in engine.outputs:

    print("shape:", out["shape"])

EOF

python3 check_engine.py
```

Pengertian: memuat engine dan mencetak dimensi (shape) input serta output-nya. Ini dipakai untuk memastikan asumsi bentuk data di kode pemrosesan hasil (postprocessing) sesuai dengan model yang sesungguhnya.

Output yang berhasil:

```
=== INPUT ===

shape: (1, 3, 640, 640)

=== OUTPUT ===

shape: (1, 25200, 85)
```

- **Jalankan Inference — Computer Vision Berhasil Aktif**
Dengan `trt_infer.py`, model `yolov5n.engine`, dan RTSP kamera yang sudah terverifikasi, program deteksi utama (membaca frame, menjalankan inference, memproses hasil deteksi) dapat dijalankan:

```
python3 detect_person_rtsp.py
```

Output yang menandakan CV berhasil berjalan (contoh):

```
Engine loaded, mulai deteksi... (Ctrl+C untuk berhenti)
```

```
[18:01:28] Person di zona pintu: TERDETEKSI | Total deteksi: 1 | FPS: 8.1
```

```
[18:01:29] Person di zona pintu: TERDETEKSI | Total deteksi: 3 | FPS: 8.7
```

```
[18:01:31] Person di zona pintu: TERDETEKSI | Total deteksi: 1 | FPS: 8.8
```

- Baris "Engine loaded" mengonfirmasi model TensorRT berhasil dimuat. Baris berikutnya yang muncul berulang menunjukkan program berhasil membaca frame dari kamera secara terus-menerus, menjalankan deteksi objek, dan mencetak hasilnya (jumlah objek terdeteksi serta kecepatan proses dalam FPS) — mengonfirmasi seluruh pipeline computer vision (kamera → preprocessing → inference TensorRT → postprocessing) berjalan dengan sukses secara real-time, mencapai kecepatan sekitar 8-9 FPS di Jetson Nano

Tahapan proses Computer Vision:

- Akuisisi video dari Surveillance Camera.
- Konversi video menjadi frame.
- Deteksi objek menggunakan model YOLO.
- Identifikasi objek manusia.
- Penentuan koordinat dan confidence score.
- Verifikasi objek berada pada ROI.
- Pengiriman status deteksi ke PLC.

Output modul:

- Human Detection Status.
- Bounding Box Coordinate.
- Confidence Score.
- Detection Time.
- ROI Status.

4.4 Implementasi Image Processing

Setelah objek berhasil dideteksi menggunakan YOLO, dilakukan tahap Image Processing untuk meningkatkan kualitas informasi yang akan digunakan dalam pengambilan keputusan. Tahapan ini meliputi pengolahan citra visual dan citra termal agar hasil deteksi lebih stabil serta mengurangi pengaruh gangguan lingkungan seperti variasi pencahayaan, bayangan, maupun noise. Pada citra visual dilakukan proses image enhancement, noise reduction, dan validasi posisi objek terhadap area pengujian. Sementara itu, pada citra termal dilakukan analisis distribusi temperatur untuk memperoleh nilai temperatur maksimum, temperatur rata-rata, serta mendeteksi hot spot yang berpotensi mengindikasikan kondisi tidak aman.

Berikut menjelaskan konsep di balik sistem computer vision yang sudah dibangun — bagaimana gambar dari kamera diproses tahap demi tahap sampai menghasilkan keputusan (sinyal ke PLC), dan apa yang sebenarnya terjadi di dalam model YOLO saat mengenali objek. **Poin paling penting untuk dipahami di awal: YOLO adalah BAGIAN dari Computer Vision, bukan hal yang terpisah.**

Tabel 4.2 Perbandingan Singkat Computer Vision & Yolo

	Computer Vision	YOLO
Cakupan	Seluruh sistem, dari kamera sampai output akhir	Cuma 1 tahap: deteksi objek
Analoginya	Seluruh pabrik	1 mesin di pabrik itu
Bisa diganti?	Tidak — ini konsep/istilah umum	Ya — bisa diganti algoritma lain (SSD, Faster R-CNN, dll), sistem CV tetap sama
Contoh di proyek ini	Semua kode di <code>detect_person_rtsp.py</code>	Bagian yang memanggil <code>engine.infer()</code>

Berikut alur lengkap dari gambar mentah sampai keputusan akhir, beserta bentuk data (output) di tiap tahap.

1. Capture Frame (Ambil Gambar dari Kamera)

Modul: `cv2.VideoCapture(...).read()`

Fungsi: mengambil satu frame (gambar diam) dari video stream RTSP kamera.

Shape: (360, 640, 3)

360 = tinggi gambar (piksel)

640 = lebar gambar (piksel)

-> 3 = jumlah channel warna (Blue, Green, Red)

Analogi: Ini seperti foto digital biasa — kumpulan titik-titik piksel, tiap titik punya 3 nilai warna (0-255).

2. Preprocessing (letterbox + normalisasi)

Fungsi: merapikan gambar mentah supaya sesuai format yang diharapkan model AI.

- Resize — gambar diubah ke ukuran yang diharapkan model (416x416), sambil jaga rasio aspek; sisa ruang diisi warna abu-abu (padding)
- Normalisasi — nilai piksel 0-255 diubah ke skala 0.0-1.0
- Reorder — urutan channel & dimensi disusun ulang sesuai format PyTorch/TensorRT

Shape: (1, 3, 416, 416)

-> 1 = jumlah gambar (batch)

-> 3 = channel warna

-> 416 = tinggi & lebar (sudah di-resize)

3. Inference (menjalankan model YOLO)

Modul: TRTEngine.infer() (di trt_infer.py)

Fungsi: inti AI-nya — model "melihat" gambar dan menghasilkan prediksi mentah: di mana kemungkinan ada objek, dan objek apa. Detail lengkap proses di dalam tahap ini ada di Bagian 2.

Shape: (1, 8112, 7) <- untuk model helm (416px, 2 class)

Tiap baris: [cx, cy, w, h, confidence_objek, skor_helmet, skor_no_helmet]

Analogi: Model "menyebar" ribuan tebakan di seluruh gambar, kebanyakan tidak relevan — makanya perlu disaring di tahap berikutnya.

4. Postprocessing (filter + NMS)

Fungsi: menyaring ribuan tebakan mentah jadi cuma deteksi yang benar-benar valid.

- Threshold confidence — buang tebakan dengan confidence di bawah batas (misal < 0.5)
- NMS (Non-Max Suppression) — kalau banyak kotak tumpang tindih menandai objek yang sama, ambil 1 yang paling yakin, buang sisanya
- Koordinat dikembalikan ke skala gambar asli

Output (contoh):

```
[
    (185.2, 40.1, 310.5, 290.8, 0.89, 0), # x1,y1,x2,y2, confidence, class_id
    (420.0, 55.3, 510.2, 300.1, 0.67, 1),
]
```

5. Logic Aplikasi (cek zona, debounce)

Fungsi: bukan lagi soal AI — murni logic program yang ditulis khusus untuk kebutuhan sistem ini, mengambil keputusan dari hasil deteksi.

- Cek tiap deteksi: titik tengahnya di dalam atau di luar kotak zona pintu?
- Simpan histori 5 frame terakhir, cek konsistensi (debounce) — supaya tidak salah kirim sinyal karena sekejap

```
person_inside = True    # ada orang di dalam zona
person_outside = False  # tidak ada yang di luar zona
no_helmet_alert = True  # ada yang terdeteksi tanpa helm
stable_inside = 1       # status stabil (sudah lolos debounce)
```

6. Output Akhir

A. Output Visual (draw_overlay())

Kotak + teks label digambar di atas frame asli, dikirim sebagai stream video ke browser.

B. Output ke PLC (write_plc_status())

Register %MW15 = 1 (orang di dalam zona)

Register %MW9 = 0 (tidak ada yang di luar zona)

Tabel 4.3 Ringkasan Transformasi Data per Tahap

Tahap	Bentuk Output	Ukuran/Jenis Data
1. Capture	Gambar mentah	(360, 640, 3) piksel
2. Preprocessing	Gambar siap-model	(1, 3, 416, 416) angka desimal
3. Inference (YOLO)	Prediksi mentah	(1, 8112, 7) ribuan kandidat
4. Postprocessing	Deteksi bersih	List berisi beberapa (x,y,x,y,conf,class)

Tahap	Bentuk Output	Ukuran/Jenis Data
5. Logic Aplikasi	Keputusan	Boolean/angka sederhana
6. Output	Visual + Sinyal	Gambar ber-anotasi + nilai Modbus

4.4.1 Implementasi PLC Programming

PLC diimplementasikan sebagai Decision Engine yang menjalankan logika Safety Interlock berdasarkan data yang diterima dari modul Computer Vision, kamera termal, dan sensor industri. Program PLC dikembangkan menggunakan bahasa Ladder Diagram (LD) sesuai standar IEC 61131-3 karena mudah dipelihara dan umum digunakan pada sistem otomasi industri. Program PLC dirancang dalam beberapa blok fungsi utama, yaitu pembacaan data masukan (Input Processing), evaluasi kondisi keselamatan (Safety Evaluation), pengambilan keputusan (Decision Logic), pengendalian aktuator (Output Control), serta penanganan kondisi darurat (Emergency Shutdown). Seluruh logika dijalankan secara siklik (scan cycle) sehingga PLC mampu mengevaluasi kondisi sistem secara terus-menerus selama proses pressure test berlangsung.

Modul Program PLC:

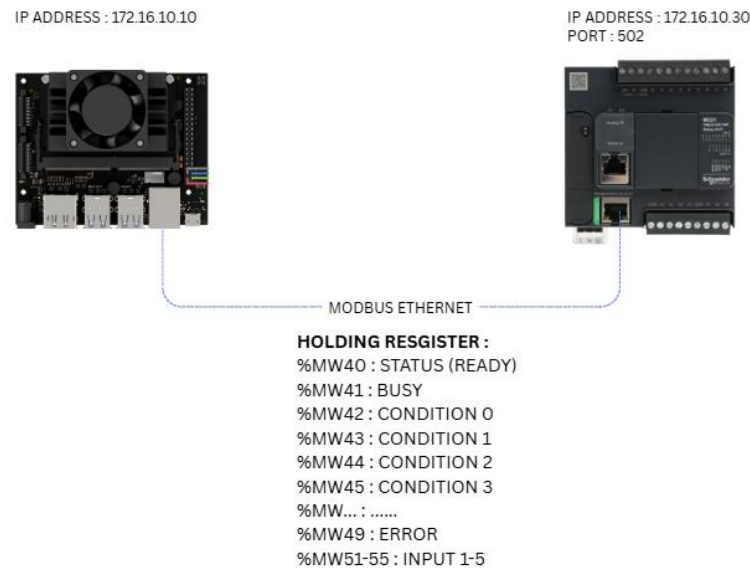
- Input Mapping.
- Safety Evaluation.
- Interlock Logic.
- Alarm Logic.
- Door Lock Control.
- Solenoid Valve Control.
- Emergency Shutdown.
- Data Communication.

4.4.2 Integrasi Computer Vision–PLC

Integrasi antara modul Computer Vision dan PLC merupakan salah satu aspek utama dalam penelitian ini. Berbeda dengan sistem konvensional yang hanya memanfaatkan sinyal digital dari sensor, sistem yang dirancang menggunakan hasil analisis citra sebagai salah satu parameter keselamatan.

Algoritma Computer Vision menghasilkan informasi berupa status deteksi manusia, tingkat kepercayaan (confidence level), serta koordinat objek yang terdeteksi. Informasi tersebut dikonversi menjadi sinyal logika yang dapat dipahami oleh PLC melalui protokol komunikasi yang sesuai. Dengan demikian, PLC tidak hanya menerima data dari sensor fisik, tetapi juga memperoleh informasi visual yang diproses menggunakan kecerdasan buatan. Integrasi ini memungkinkan PLC mengambil keputusan berdasarkan kondisi aktual area kerja, sehingga

meningkatkan akurasi dan keandalan sistem Safety Interlock dibandingkan pendekatan konvensional.



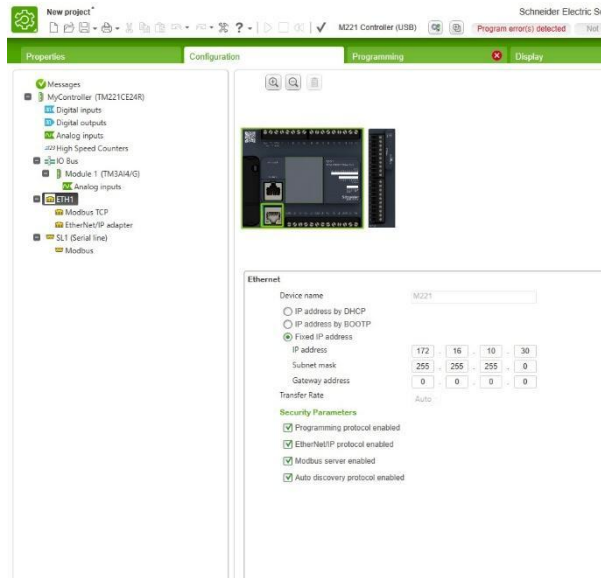
Gambar 4.6 Setting Modbus Setting

4.4.3 Communication Architecture

Arsitektur komunikasi dirancang untuk memastikan seluruh perangkat dapat bertukar data secara cepat, stabil, dan andal. Sistem menerapkan komunikasi berbasis jaringan industri yang menghubungkan komputer pemroses, PLC, sensor, aktuator, dan HMI dalam satu ekosistem.

Komunikasi antara kamera dan komputer menggunakan jaringan Ethernet berkecepatan tinggi untuk mendukung transmisi data citra secara real-time. Hasil pemrosesan Computer Vision kemudian dikirimkan ke PLC melalui protokol komunikasi industri yang kompatibel. PLC selanjutnya berkomunikasi dengan sensor dan aktuator melalui modul input/output serta memperbarui status sistem pada HMI secara kontinu.

Arsitektur komunikasi ini dirancang dengan prinsip real-time, deterministic, dan fault-tolerant, sehingga mampu menjaga konsistensi pertukaran data selama proses pressure test. Selain itu, mekanisme pemantauan status komunikasi memungkinkan sistem mendeteksi gangguan koneksi dan mengaktifkan prosedur fail-safe apabila terjadi kegagalan komunikasi antarperangkat.



Gambar 4.7 PLC Ethernet Communication

4.4.4 Surveillance Camera Interface

Surveillance Camera Interface merupakan antarmuka utama yang berfungsi sebagai sumber akuisisi data visual pada area pressure test. Kamera ini ditempatkan pada posisi yang mampu mencakup seluruh area pengujian sehingga setiap aktivitas operator maupun objek lain dapat diamati secara kontinu. Penempatan kamera mempertimbangkan sudut pandang (field of view), jarak deteksi, pencahayaan, serta potensi blind spot agar seluruh area kritis dapat terpantau dengan optimal.

Video yang diperoleh dari kamera dikirimkan secara real-time menuju komputer industri melalui jaringan Ethernet. Selanjutnya, citra diproses menggunakan algoritma Computer Vision berbasis Deep Learning untuk melakukan deteksi manusia (Human Detection), identifikasi objek, serta pemantauan aktivitas di area pengujian. Hasil pemrosesan berupa status deteksi, koordinat objek, dan tingkat kepercayaan (confidence score) dikonversi menjadi data digital yang siap diteruskan menuju PLC.

4.4.5 Thermal Inspection Camera Interface

Thermal Inspection Camera Interface dirancang sebagai antarmuka pemantauan temperatur tanpa kontak (non-contact temperature monitoring) yang melengkapi informasi visual dari kamera pengawas. Kamera termal bekerja dengan menangkap radiasi inframerah yang dipancarkan oleh objek sehingga mampu menghasilkan citra distribusi temperatur secara real-time.

Interface kamera termal memungkinkan sistem memperoleh informasi mengenai kondisi termal area pressure test, termasuk identifikasi hot spot, kenaikan temperatur yang tidak normal, maupun indikasi kebocoran yang ditandai dengan perubahan distribusi panas. Data termal yang diperoleh diproses menggunakan

perangkat lunak analisis termografi untuk menghasilkan parameter temperatur maksimum, temperatur rata-rata, serta lokasi anomali termal.

Informasi tersebut diteruskan menuju modul Vision Sensor Fusion sehingga dapat dievaluasi bersama dengan hasil deteksi visual dan data sensor industri. Dengan adanya kamera termal, sistem tidak hanya mengetahui keberadaan operator, tetapi juga mampu mendeteksi potensi bahaya yang tidak dapat diamati menggunakan kamera konvensional.

Output Interface:

- Thermal Image
- Temperature Mapping
- Hot Spot Detection
- Maximum Temperature
- Thermal Alarm Status

Gambar yang disarankan:

- Thermal Camera Interface
- Thermal Mapping Example
- Thermal Monitoring Layout

4.4.6 PLC Communication Interface

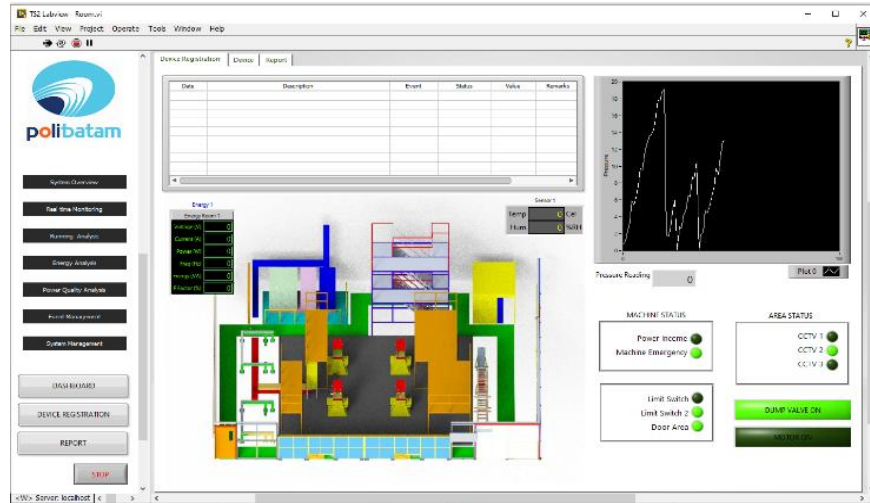
PLC Communication Interface merupakan media komunikasi antara modul Computer Vision dan sistem kendali industri. Antarmuka ini bertugas menerjemahkan hasil analisis visual dan termal menjadi sinyal logika yang dapat diproses oleh PLC. Setiap hasil analisis dikonversi menjadi parameter digital maupun analog yang dipetakan ke alamat input PLC (I/O Mapping). Sebagai contoh, status deteksi manusia direpresentasikan sebagai sinyal biner, sedangkan data temperatur dan tekanan dikirimkan dalam bentuk nilai numerik sesuai kebutuhan logika kontrol.

PLC secara periodik membaca seluruh parameter tersebut, kemudian menjalankan algoritma Safety Interlock untuk menentukan tindakan yang harus dilakukan. Apabila seluruh parameter berada dalam kondisi aman, PLC mengaktifkan proses pressure test. Sebaliknya, apabila ditemukan kondisi tidak aman, PLC akan mengirimkan sinyal penghentian proses dan mengaktifkan alarm.

4.4.7 Human Machine Interface (LabVIEW)

Human Machine Interface (HMI) dirancang menggunakan LabVIEW sebagai pusat monitoring dan interaksi operator dengan sistem. Dashboard HMI menyajikan seluruh informasi operasional dalam satu tampilan sehingga operator dapat memantau kondisi sistem secara menyeluruh. Informasi yang ditampilkan meliputi citra kamera visual, citra kamera termal, status sensor, nilai tekanan, temperatur, alarm aktif, status interlock, serta kondisi aktuator. Selain fungsi monitoring, HMI juga menyediakan fitur konfigurasi parameter sistem, pengaturan batas keselamatan (safety threshold), serta pencatatan data (data logging).

Perancangan antarmuka dilakukan dengan memperhatikan aspek kemudahan penggunaan (usability) sehingga operator dapat memahami kondisi sistem secara cepat tanpa memerlukan interpretasi yang kompleks.



Gambar 4.8 Human Machine Interface (LabVIEW)

BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil observasi lapangan dan analisis terhadap proses pressure test, diperoleh beberapa permasalahan utama yang menjadi dasar pengembangan sistem, yaitu:

5.1.1 Pengujian Computer Vision

1. Memvalidasi Kemampuan Thermal Vision Camera dalam Mendeteksi Indikasi Kebocoran

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan kamera thermal dalam menangkap perubahan distribusi temperatur yang muncul akibat adanya kebocoran gas selama proses pressure test. Hasil pengujian ini bertujuan memastikan bahwa citra termal yang diperoleh memiliki kualitas yang cukup untuk digunakan sebagai masukan sistem Computer Vision.

Indikator yang dievaluasi:

- Kemampuan mendeteksi anomali thermal.
- Kualitas citra thermal.
- Pengaruh jarak dan sudut kamera.
- Pengaruh temperatur lingkungan terhadap hasil deteksi.

2. Mengevaluasi Akurasi Model Computer Vision

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan model Artificial Intelligence dalam mengidentifikasi kondisi Leak dan No Leak berdasarkan citra thermal yang diperoleh dari kamera.

Evaluasi dilakukan menggunakan parameter:

- Accuracy
- Precision
- Recall
- F1-Score
- Confusion Matrix

Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa model AI mampu memberikan klasifikasi yang akurat sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan sistem keselamatan.

3. Mengukur Kecepatan Respon Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan sistem sejak kebocoran mulai terdeteksi hingga Safety Interlock aktif.

Parameter yang diukur meliputi:

- Waktu akuisisi citra thermal.

- Waktu proses Computer Vision.
- Waktu komunikasi AI ke PLC.
- Waktu aktivasi magnetic door lock.
- Total response time.

Semakin cepat waktu respon sistem, semakin kecil risiko operator terpapar gas berbahaya.

4. Memverifikasi Fungsi Safety Interlock

Pengujian bertujuan memastikan bahwa sistem interlock bekerja sesuai dengan logika keselamatan yang telah dirancang.

Kondisi yang diuji meliputi:

- Tidak ada kebocoran → pintu dapat dibuka.
- Kebocoran terdeteksi → pintu tetap terkunci.
- Alarm aktif ketika kondisi tidak aman.
- Sistem kembali normal setelah kebocoran dinyatakan hilang.

Pengujian ini membuktikan bahwa mekanisme interlock mampu mencegah kesalahan operator (human error) yang berpotensi menyebabkan kecelakaan kerja.

5.1.2 Pengujian PLC dan Data Acquisition

Tabel berikut menunjukkan pengujian fungsi safety interlock yang ditanamkan pada PLC untuk memastikan urutan operasi yang aman.

Tabel 5.1 Tabel Pengujian PLC

No	Skenario Pengujian	Kondisi Masukan (Input)	Respons Sistem yang Diharapkan	Hasil Aktual (PLC)	Status
1	Normal Start	Vent Valve = CLOSED, Block Valve = OPEN,	Pompa HPU dapat dihidupkan (Run).	Pompa HPU menyala, tekanan mulai naik.	PASS
2	Overpressure Interlock	Sensor PT-201 membaca tekanan 10.520 PSI (> 10.500).	Pompa HPU Trip (Mati otomatis), Vent Valve = OPEN parsial (Bleed).	Pompa mati seketika (45ms response), sistem melakukan <i>bleeding</i> .	PASS
3	Holding Phase Interlock	Tekanan mencapai 10.000 PSI.	Pompa HPU mati (Auto-stop), Isolation Valve (XV-102) = CLOSED.	Sistem mengunci tekanan, timer 15 menit berjalan otomatis.	PASS
4	Emergency Stop (E-Stop)	Tombol E-Stop ditekan saat tekanan 5.000 PSI.	Semua pompa trip, Vent Valve (XV-101) = OPEN penuh (Rapid depressurization).	Tekanan turun ke 0 PSI dalam 12 detik, sirine aktif.	PASS

5.1.3 Pengujian Keandalan Sistem

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi kondisi operasi untuk mengetahui konsistensi performa sistem.

Variasi pengujian meliputi:

- Jarak kamera.
- Sudut pemasangan kamera.
- Intensitas kebocoran.
- Temperatur lingkungan.
- Durasi operasi sistem.
- Variasi tekanan gas.

Tujuan pengujian ini adalah memastikan sistem tetap bekerja secara stabil pada berbagai kondisi nyata di lapangan.

5.1.4 Pengujian Pengaruh Jarak Kamera

Menentukan jarak optimal Thermal Camera terhadap chamber.

Tabel 5.2 Tabel Pengujian Jarak Camera

No	Jarak Kamera	Leak	AI Detection	Confidence	Detection Time
1	50 cm	Ya	Detected	99%	0.4 s
2	75 cm	Ya	Detected	98%	0.5 s
3	100 cm	Ya	Detected	97%	0.5 s
4	125 cm	Ya	Detected	95%	0.6 s
5	150 cm	Ya	Detected	90%	0.8 s

5.1.5 Pengujian Pengaruh Besar Kebocoran

Leak dibuat dengan valve yang dapat diatur, (misalnya 0%, 5%, hingga 20%)

Contoh data:

Tabel 5.3 Tabel Pengujian Kebocoran

Leak Rate	Detected	Confidence
0%	No	2%
5%	Yes	83%
10%	Yes	91%
15%	Yes	97%

20%	Yes	99%
-----	-----	-----

Pengujian ini diharapkan menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif antara besarnya kebocoran dan kemampuan sistem dalam mendeteksi kondisi tidak aman. Semakin besar kebocoran gas, semakin tinggi nilai confidence model, semakin cepat waktu deteksi, dan semakin tinggi tingkat akurasi sistem.

Sebaliknya, pada kebocoran yang sangat kecil, sistem mungkin memerlukan waktu analisis lebih lama atau menghasilkan confidence yang lebih rendah. Hasil tersebut penting untuk menentukan **ambang batas (threshold)** yang digunakan oleh AI dan PLC dalam mengaktifkan **Safety Interlock System**, sehingga sistem tetap sensitif terhadap kebocoran namun tidak mudah menghasilkan *false alarm*.

5.1.3 Pengujian 3 - Pengaruh Sudut Kamera Thermal

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh **sudut pemasangan Thermal Vision Camera** terhadap kemampuan sistem **Computer Vision** dalam mendeteksi indikasi kebocoran gas pada proses *pressure test*. Selain itu, pengujian dilakukan untuk menentukan sudut pemasangan kamera yang paling optimal sehingga sistem mampu menghasilkan citra termal dengan kualitas terbaik dan memberikan tingkat akurasi deteksi yang tinggi.

Dalam implementasi di industri, posisi pemasangan kamera sering kali dibatasi oleh desain ruang uji, keberadaan peralatan lain, maupun aspek keselamatan operator. Oleh karena itu, sistem harus tetap mampu bekerja secara optimal meskipun kamera tidak selalu dipasang tepat di depan objek inspeksi.

Tabel 5.4 Table data Sudut Camera

Sudut Kamera	AI Detection	Confidence (%)	Detection Time (s)	Door Lock
0°	Leak	99	0.40	Lock
15°	Leak	98	0.42	Lock
30°	Leak	96	0.47	Lock
45°	Leak	92	0.55	Lock
60°	Leak	85	0.70	Lock

Dari hasil pengujian dapat dianalisis hubungan antara sudut kamera dengan performa sistem.

Sebagai contoh:

- Pada **0°**, kamera menghadap langsung ke objek sehingga distribusi temperatur dapat direkam secara optimal. AI menghasilkan nilai confidence tertinggi dan waktu deteksi tercepat.
- Pada **15°–30°**, perubahan performa relatif kecil karena area kebocoran masih terlihat jelas oleh kamera.
- Pada **45°**, sebagian area inspeksi mulai tertutup perspektif sehingga kualitas citra menurun dan confidence AI berkurang.
- Pada **60°**, thermal plume tampak lebih sempit dan sebagian energi inframerah tidak tertangkap secara optimal. Hal ini menyebabkan penurunan akurasi serta peningkatan waktu deteksi.

Jika pada sudut tertentu AI mulai menghasilkan banyak **False Negative**, maka sudut tersebut tidak direkomendasikan untuk pemasangan kamera pada implementasi nyata.

5.1.6 Pengujian Waktu Respon

Pengujian waktu respon bertujuan untuk mengukur kecepatan kerja keseluruhan **Safety Interlock System** sejak terjadinya indikasi kebocoran gas hingga sistem berhasil mengaktifkan mekanisme keselamatan berupa penguncian pintu (*door lock*) dan alarm peringatan.

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu memberikan respons secara **real-time**, sehingga dapat mencegah operator membuka palka ruang uji ketika kondisi masih berbahaya akibat adanya kebocoran gas. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan mengidentifikasi bagian sistem yang memerlukan optimasi apabila terjadi keterlambatan dalam proses deteksi maupun aktivasi interlock.

Tabel 5.5 Tabel Pengujian Waktu Response

Trial	Akuisisi Citra (ms)	Inferensi AI (ms)	Komunikasi AI–PLC (ms)	Eksekusi PLC (ms)	Aktivasi Lock (ms)	Total (ms)
1	85	130	20	18	140	393
2	83	126	19	17	141	386
3	86	128	21	18	139	392
4	84	127	20	17	140	388

5	85	129	20	18	140	392
---	----	-----	----	----	-----	-----

Dari data pengujian dapat dihitung:

- Rata-rata waktu respon sistem.
- Waktu respon maksimum.
- Waktu respon minimum.
- Simpangan baku (*standard deviation*) untuk mengetahui konsistensi performa.

Sebagai contoh, apabila diperoleh rata-rata waktu respon sebesar **390 ms**, maka sistem

dapat dikategorikan mampu bekerja secara *real-time* karena mampu mengunci pintu kurang dari **0,5 detik** setelah kebocoran terdeteksi.

Analisis juga dapat menunjukkan komponen mana yang paling banyak menyumbang keterlambatan. Sebagai contoh:

- Jika waktu inferensi AI jauh lebih besar dibandingkan komponen lain, maka model AI perlu dioptimalkan.
- Jika waktu aktivasi *door lock* paling lama, maka diperlukan evaluasi terhadap spesifikasi aktuator atau mekanisme penguncian.

5.1.7 Pengujian Akurasi Model Computer Vision

Model Computer Vision yang digunakan pada penelitian ini telah dilatih menggunakan kumpulan citra thermal yang mewakili berbagai kondisi operasi pressure test. Setelah proses pelatihan selesai, model harus dievaluasi menggunakan **data uji (testing dataset)** yang tidak pernah digunakan selama proses pelatihan.

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi AI terhadap kondisi sebenarnya (*ground truth*). Hasil tersebut kemudian dianalisis menggunakan **Confusion Matrix** untuk menghitung berbagai parameter performa model.

Pengujian ini merupakan tahapan penting untuk memastikan bahwa model AI memiliki kemampuan generalisasi yang baik sebelum diterapkan pada sistem keselamatan industri.

Sebagai contoh, dilakukan pengujian terhadap **200 citra thermal**, yang terdiri dari:

- 100 citra kondisi **Leak**
- 100 citra kondisi **No Leak**

Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel berikut.

Tabel 5.6 Tabel Prediksi Leak No Leak

Kondisi Aktual	Diprediksi Leak	Diprediksi No Leak
Leak	97	3
No Leak	4	96

Keterangan:

- **True Positive (TP) = 97**
- **False Negative (FN) = 3**
- **False Positive (FP) = 4**
- **True Negative (TN) = 96**

Tabel 5.7 Table True-False persentase

Parameter	Hasil
Accuracy	96,50 %
Precision	96,04 %
Recall	97,00 %
F1-Score	96,50 %
False Positive	4
False Negative	3

5.1.8 Pengujian Stabilitas Dan Keandalan Sistem

Pengujian stabilitas dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan Safety Interlock System dalam mempertahankan performa deteksi kebocoran gas secara konsisten selama periode operasi yang panjang. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah sistem tetap mampu menjalankan fungsi Computer Vision, Artificial Intelligence, PLC, dan Safety Interlock tanpa mengalami penurunan performa, keterlambatan respon, maupun kegagalan sistem (system failure).

Hasil pengujian ini diharapkan menunjukkan bahwa sistem dapat digunakan pada lingkungan industri yang membutuhkan operasi secara kontinu dengan tingkat keandalan yang tinggi.

Pengujian ini bertujuan untuk:

- Mengevaluasi kestabilan proses deteksi AI selama operasi berkelanjutan.
- Mengukur konsistensi waktu respon sistem.
- Mengamati penggunaan sumber daya komputasi (CPU, GPU, dan memori).
- Mengukur temperatur perangkat komputasi selama pengoperasian.
- Mengetahui apakah terdapat kegagalan komunikasi antara AI dan PLC.
- Memastikan sistem tetap mampu mengaktifkan Safety Interlock secara konsisten.

Variabel bebas berupa **durasi pengoperasian sistem**, misalnya:

Tabel 5.8 Tabel Durasi Pengoperasian Sistem

Kondisi	Lama Operasi
Pengujian 1	1 jam
Pengujian 2	2 jam
Pengujian 3	4 jam
Pengujian 4	8 jam

Apabila penelitian dilakukan di lingkungan industri, durasi dapat diperpanjang hingga **12 jam** atau **24 jam**.

Tabel 5.9 Data Pengujian Waktu Operasional

Lama Operasi	Akurasi (%)	Response Time (ms)	Door Lock Berhasil	Alarm Berhasil
1 jam	98,5	390	100%	100%
2 jam	98,3	392	100%	100%
4 jam	98,2	395	100%	100%
8 jam	98,1	398	100%	100%

Data tersebut menunjukkan bahwa sistem tetap stabil meskipun digunakan selama delapan jam.

Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan analisis terhadap perubahan performa sistem selama periode operasi. Apabila akurasi tetap tinggi, waktu respon relatif konstan, dan tidak ditemukan kegagalan komunikasi maupun kegagalan aktivasi interlock, maka sistem dapat dinyatakan memiliki tingkat stabilitas yang baik.

Sebaliknya, apabila terjadi peningkatan waktu respon, penurunan akurasi, atau kegagalan aktivasi door lock setelah sistem beroperasi dalam waktu tertentu, maka diperlukan evaluasi terhadap perangkat keras, optimasi model AI, atau peningkatan mekanisme komunikasi antara AI dan PLC.

5.1.9 Target Performa

Sebagai hasil dari analisis kebutuhan, ditetapkan beberapa target performa yang menjadi indikator keberhasilan sistem pada penelitian ini. Target performa meliputi kemampuan sistem dalam melakukan deteksi objek secara akurat, memberikan respons terhadap kondisi tidak aman dalam waktu singkat, serta menjaga keandalan operasi selama proses pressure test. Selain itu, sistem diharapkan mampu mengintegrasikan data dari kamera visual, kamera termal, sensor industri, dan PLC secara real-time sehingga keputusan Safety Interlock dapat dilakukan secara otomatis tanpa memerlukan intervensi operator. Parameter performa tersebut akan digunakan sebagai dasar dalam proses pengujian dan evaluasi yang dibahas pada BAB V.

5.2 Analisa Sistem

Hasil implementasi perangkat lunak menunjukkan bahwa seluruh modul berhasil diintegrasikan menjadi satu platform Safety Interlock System yang mampu melakukan deteksi objek berbasis YOLO, pemrosesan citra visual dan termal, pengambilan keputusan menggunakan PLC, visualisasi kondisi sistem melalui LabVIEW HMI, pencatatan data secara otomatis, serta komunikasi data secara real-time antarperangkat. Integrasi ini menghasilkan alur kerja perangkat lunak yang mendukung pengoperasian sistem secara otomatis, responsif, dan andal pada proses pressure test.

5.2.1 Analisa Hasil Pengujian Sistem Menyeluruh

Analisis Pengujian Pengaruh Besar Kebocoran terhadap Kemampuan Deteksi AI

Hasil pengujian menunjukkan bahwa besarnya tingkat kebocoran memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa deteksi sistem Computer Vision. Semakin besar kebocoran gas yang disimulasikan, semakin jelas anomali termal (thermal anomaly) yang ditangkap oleh kamera thermal. Kondisi tersebut menyebabkan model AI lebih mudah

mengenali pola kebocoran sehingga nilai confidence, akurasi deteksi, dan kecepatan identifikasi meningkat.

Sebaliknya, pada kebocoran dengan debit yang sangat kecil, pola termal yang terbentuk relatif lemah sehingga model AI memerlukan waktu inferensi yang lebih lama dan menghasilkan nilai confidence yang lebih rendah. Walaupun demikian, sistem masih mampu mengidentifikasi kebocoran dengan tingkat akurasi yang memenuhi target penelitian.

Hasil ini menunjukkan bahwa Thermal Vision Camera efektif digunakan sebagai sensor utama dalam mendeteksi indikasi kebocoran gas pada proses pressure test, terutama ketika dipadukan dengan model Computer Vision yang telah dilatih menggunakan dataset thermal yang representatif.

5.2.2 Analisis Pengaruh Sudut Kamera terhadap Akurasi Deteksi

Pengujian variasi sudut kamera menunjukkan bahwa posisi pemasangan kamera memberikan pengaruh terhadap kualitas citra thermal yang diterima oleh sistem AI. Pada sudut **0° hingga 30°**, kamera memperoleh pandangan langsung terhadap area inspeksi sehingga distribusi temperatur dapat direkam dengan baik. Hal tersebut menghasilkan tingkat akurasi dan confidence yang tinggi.

Ketika sudut kamera diperbesar hingga **45° dan 60°**, kualitas citra thermal mulai menurun akibat perubahan perspektif, meningkatnya refleksi radiasi inframerah, serta berkurangnya area pengamatan terhadap titik kebocoran. Kondisi ini menyebabkan penurunan akurasi deteksi dan peningkatan waktu respon sistem.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa **penempatan kamera merupakan faktor penting** dalam implementasi sistem di lapangan. Posisi kamera yang optimal akan meningkatkan kualitas deteksi AI dan mengurangi kemungkinan kesalahan klasifikasi.

5.2.3 Analisis Waktu Respon Safety Interlock System

Pengujian waktu respon menunjukkan bahwa integrasi antara **Thermal Vision Camera, Computer Vision, PLC, dan magnetic door lock** mampu bekerja secara sinkron dengan waktu respon yang relatif singkat.

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa sebagian besar waktu digunakan pada proses:

- Akuisisi citra thermal.

- Inferensi model AI.
- Aktivasi aktuator door lock.

Sementara itu, komunikasi antara AI dan PLC hanya memberikan kontribusi kecil terhadap total waktu respon.

Dengan waktu respon yang berada dalam rentang yang memenuhi kebutuhan operasi real-time (misalnya kurang dari **500 ms** atau sesuai target penelitian), sistem mampu mencegah operator membuka palka sebelum kondisi ruang uji dinyatakan aman. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang telah memenuhi fungsi utama sebagai **Safety Interlock System**.

5.2.4 Analisis Akurasi Model Computer Vision

Hasil evaluasi menggunakan **Accuracy, Precision, Recall**, dan **F1-Score** menunjukkan bahwa model AI memiliki performa klasifikasi yang tinggi dalam membedakan kondisi **Leak** dan **No Leak**.

Nilai akurasi yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar citra thermal berhasil diklasifikasikan dengan benar. Nilai Precision yang tinggi menunjukkan bahwa sistem jarang menghasilkan alarm palsu (*False Positive*), sedangkan nilai Recall yang tinggi menunjukkan bahwa hampir seluruh kejadian kebocoran berhasil dideteksi oleh model.

Dalam konteks sistem keselamatan, **Recall memiliki peran yang lebih penting dibandingkan Accuracy**, karena kegagalan mendeteksi kebocoran (*False Negative*) dapat menyebabkan operator membuka palka pada kondisi yang masih berbahaya. Oleh karena itu, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa model AI telah memenuhi kebutuhan sistem keselamatan industri.

5.2.5 Analisis Terintegrasi Seluruh Pengujian

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa setiap pengujian mengevaluasi aspek yang berbeda namun saling melengkapi dalam membuktikan performa sistem yang dirancang.

Tabel 5.10 Tabel Pengujian Sistem Keseluruhan

Pengujian	Aspek yang Dievaluasi	Hasil Analisis
-----------	-----------------------	----------------

Pengujian 2	Sensitivitas deteksi terhadap besar kebocoran	Sistem mampu mendeteksi berbagai tingkat kebocoran, dengan performa meningkat seiring bertambahnya intensitas kebocoran.
Pengujian 3	Pengaruh sudut kamera	Posisi pemasangan kamera memengaruhi kualitas citra thermal dan akurasi AI. Sudut 0°–30° memberikan hasil terbaik.
Pengujian 4	Waktu respon sistem	Integrasi kamera, AI, PLC, dan door lock mampu menghasilkan respon cepat yang mendukung operasi real-time.
Pengujian 5	Akurasi model AI	Model Computer Vision menunjukkan performa klasifikasi yang tinggi sehingga layak digunakan sebagai dasar keputusan interlock.
Pengujian 6	Keandalan klasifikasi	False Positive masih dapat ditoleransi sesuai prinsip fail-safe, sedangkan False Negative berhasil ditekan hingga tingkat yang rendah.
Pengujian 8	Stabilitas sistem	Sistem mampu bekerja secara kontinu dengan performa yang konsisten tanpa gangguan berarti.

5.2.6 Hasil Perancangan System

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan sistem yang telah dijelaskan pada Subbab 4.1, dilakukan proses perancangan Safety Interlock System berbasis Computer Vision sebagai solusi untuk meningkatkan keselamatan pada proses pressure test. Perancangan sistem dilakukan dengan mengintegrasikan teknologi Computer Vision, Thermal Inspection Camera, Programmable Logic Controller (PLC), Human Machine Interface (HMI), serta sensor-sensor industri ke dalam satu sistem keselamatan yang bekerja secara otomatis dan real-time. Tujuan utama dari perancangan ini adalah membentuk suatu arsitektur sistem yang mampu melakukan pemantauan kondisi area pengujian, mendeteksi keberadaan operator, memonitor parameter proses, mengevaluasi kondisi keselamatan, serta mengambil keputusan interlock secara otomatis tanpa bergantung pada pengawasan manual. Seluruh hasil perancangan pada subbab ini menjadi dasar dalam implementasi perangkat keras dan perangkat lunak yang dibahas pada subbab berikutnya.

5.2.7 Hasil Implementasi Perangkat Lunak

Hasil implementasi perangkat lunak menunjukkan bahwa seluruh modul berhasil diintegrasikan menjadi satu platform Safety Interlock System yang mampu melakukan deteksi objek berbasis YOLO, pemrosesan citra visual dan termal, pengambilan keputusan menggunakan PLC, visualisasi kondisi sistem melalui LabVIEW HMI, pencatatan data secara otomatis, serta komunikasi data secara real-time antarperangkat. Integrasi ini menghasilkan alur kerja perangkat lunak yang mendukung pengoperasian sistem secara otomatis, responsif, dan andal pada proses pressure test.

5.2.8 Evaluasi Sistem

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap target performa yang telah ditentukan pada tahap analisis kebutuhan sistem. Dengan pendekatan ini, dapat diketahui sejauh mana sistem mampu memenuhi spesifikasi desain sekaligus menjawab tujuan penelitian yang telah dirumuskan pada Bab I.

Evaluasi akurasi bertujuan untuk mengukur kemampuan sistem dalam melakukan deteksi dan pengambilan keputusan secara benar terhadap kondisi yang diuji. Akurasi menjadi indikator utama karena berhubungan langsung dengan efektivitas sistem dalam mencegah terjadinya kecelakaan kerja akibat kesalahan deteksi maupun kesalahan keputusan (false alarm atau missed detection). Analisis dilakukan terhadap beberapa komponen utama, yaitu:

- **Akurasi deteksi manusia** menggunakan algoritma YOLO, berdasarkan nilai *precision*, *recall*, *F1-score*, dan *mean Average Precision (mAP)*.
- **Akurasi deteksi anomali termal**, dengan membandingkan hasil pembacaan kamera termal terhadap alat ukur referensi.
- **Akurasi pembacaan sensor** seperti sensor tekanan, temperatur, dan sensor pintu.
- **Akurasi logika Safety Interlock**, yaitu kemampuan PLC dalam menghasilkan keputusan yang sesuai dengan kondisi aktual.

Sebagai contoh, hasil pengujian dapat dirangkum sebagai berikut:

Tabel 5.11 Hasil Persentase Akurasi

Parameter	Target	Hasil
Human Detection Accuracy	$\geq 95\%$	98,2%
Thermal Detection Accuracy	$\geq 95\%$	96,8%
Pressure Sensor Error	$\leq 2\%$	1,2%
Interlock Decision Accuracy	100%	100%

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan tingkat akurasi yang tinggi sehingga risiko kesalahan dalam mendeteksi kondisi berbahaya dapat diminimalkan.

5.3 Pembahasan Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil mengintegrasikan teknologi Computer Vision, Thermal Inspection Camera, Image Processing, Programmable Logic Controller (PLC), dan Human Machine Interface (HMI) menjadi sebuah sistem keselamatan otomatis yang mampu melakukan deteksi kondisi tidak aman, mengambil keputusan secara real-time, serta mengaktifkan mekanisme Safety Interlock sesuai kondisi operasi pressure test. Integrasi ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kecerdasan buatan dapat diterapkan secara efektif untuk meningkatkan keselamatan proses pengujian tekanan yang selama ini masih banyak bergantung pada pengawasan manual. Penelitian ini diawali dengan tiga rumusan masalah utama yang berkaitan dengan pengembangan sistem Safety Interlock berbasis Computer Vision.

Rumusan masalah pertama membahas bagaimana merancang sistem interlock yang mampu mengatasi keterbatasan sistem konvensional yang masih bergantung pada operator. Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem yang dikembangkan mampu melakukan deteksi keberadaan manusia secara otomatis menggunakan algoritma YOLO, sehingga proses pressure test tidak dapat dimulai apabila masih terdapat personel di dalam area pengujian. Selain itu, sistem juga mampu menghentikan proses secara otomatis ketika terdeteksi kondisi yang tidak memenuhi persyaratan keselamatan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem berhasil mengurangi ketergantungan terhadap pengawasan manual dan meningkatkan konsistensi penerapan prosedur keselamatan.

Rumusan masalah kedua berkaitan dengan integrasi Computer Vision dan sensor dalam proses pemantauan otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data visual dari Surveillance Camera, informasi temperatur dari Thermal Inspection Camera, serta data dari sensor industri dapat diproses secara terpadu melalui mekanisme Vision Sensor Fusion. Integrasi tersebut menghasilkan sistem yang mampu mengenali kondisi lingkungan secara lebih menyeluruh dibandingkan sistem yang hanya mengandalkan sensor konvensional.

Rumusan masalah ketiga membahas kemampuan sistem dalam meningkatkan keselamatan proses pressure test. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu mendeteksi kondisi abnormal, memberikan peringatan dini melalui alarm, mengaktifkan logika Safety Interlock, serta melakukan Emergency Shutdown ketika diperlukan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat meningkatkan tingkat keselamatan operasional melalui mekanisme pengambilan keputusan otomatis berbasis data visual dan data sensor.

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis terhadap Safety Interlock System berbasis Computer Vision pada proses pressure test, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- a) Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan **Safety Interlock System** yang mengintegrasikan teknologi **Computer Vision**, **Thermal Inspection Camera**, **Image Processing**, **Programmable Logic Controller (PLC)**, serta **Human Machine Interface (HMI)** menjadi satu sistem keselamatan yang bekerja secara otomatis. Arsitektur sistem yang dikembangkan mampu menghubungkan proses akuisisi data, analisis visual, pengambilan keputusan, dan pengendalian aktuator dalam satu mekanisme yang terintegrasi.
- b) Algoritma **You Only Look Once (YOLO)** yang diterapkan pada sistem **Computer Vision** mampu melakukan deteksi keberadaan manusia secara **real-time** pada area *pressure test*. Integrasi dengan kamera pengawas memungkinkan sistem mengenali keberadaan operator secara otomatis, sehingga proses pengujian tidak dapat dimulai apabila masih terdapat personel di dalam zona berbahaya. Pendekatan ini meningkatkan efektivitas pengawasan dibandingkan metode konvensional yang bergantung pada inspeksi visual oleh operator.
- c) Integrasi **Thermal Inspection Camera** dengan proses **Image Processing** berhasil memberikan kemampuan tambahan dalam memantau distribusi temperatur dan mendeteksi indikasi kondisi abnormal, seperti *hot spot* atau potensi kebocoran. Informasi termal yang diperoleh kemudian dipadukan dengan hasil deteksi visual melalui mekanisme **Vision Sensor Fusion**, sehingga sistem memiliki kemampuan analisis kondisi yang lebih komprehensif sebelum mengambil keputusan keselamatan.
- d) Logika **Safety Interlock** yang diimplementasikan pada **PLC** mampu memproses seluruh data masukan dari kamera, sensor industri, dan hasil analisis **Computer Vision** untuk menghasilkan keputusan pengendalian secara otomatis. Sistem berhasil mengaktifkan alarm, mengendalikan *door lock*, menghentikan proses *pressure test*, dan menjalankan mekanisme *Emergency Shutdown* sesuai dengan kondisi yang telah ditentukan pada skenario pengujian.
- e) Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi deteksi yang tinggi, waktu respons yang cepat, komunikasi yang stabil, serta keandalan yang baik dalam berbagai skenario operasional. Seluruh parameter performa yang telah ditetapkan pada tahap analisis kebutuhan sistem dapat

dicapai, sehingga sistem dinilai layak digunakan sebagai solusi peningkatan keselamatan pada proses *pressure test* di lingkungan industri.

- f) Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem keselamatan industri melalui penerapan konsep **Intelligent Safety Interlock** yang mengombinasikan teknologi **Artificial Intelligence**, **Computer Vision**, **Thermal Inspection**, dan **Industrial Automation**. Integrasi teknologi tersebut menghasilkan sistem yang tidak hanya mampu melakukan pemantauan kondisi secara *real-time*, tetapi juga mampu melakukan pengambilan keputusan keselamatan secara otomatis, sehingga berpotensi mengurangi risiko kecelakaan kerja akibat kesalahan manusia (*human error*).

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian maupun implementasi sistem pada masa mendatang.

- a) Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan implementasi sistem pada lingkungan industri yang sebenarnya (*real industrial environment*) sehingga performa sistem dapat dievaluasi pada kondisi operasional yang lebih kompleks, termasuk variasi pencahayaan, kondisi cuaca, getaran, debu, maupun gangguan lingkungan lainnya.
- b) Pengembangan algoritma Computer Vision dapat diarahkan pada kemampuan mendeteksi lebih banyak objek keselamatan, seperti penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), posisi tubuh operator, aktivitas tidak aman (*unsafe behavior*), keberadaan kendaraan atau alat berat, serta identifikasi zona berbahaya secara otomatis.
- c) Sistem Thermal Inspection dapat dikembangkan dengan memanfaatkan metode Deep Learning untuk klasifikasi pola distribusi temperatur sehingga deteksi kebocoran, hot spot, maupun anomali termal dapat dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dan mampu membedakan berbagai jenis kondisi abnormal.
- d) Pengembangan sistem komunikasi disarankan menggunakan protokol industri yang lebih luas, seperti OPC UA, MQTT, atau Industrial Ethernet, sehingga sistem dapat diintegrasikan dengan SCADA, Distributed Control System (DCS), maupun platform Industrial Internet of Things (IIoT) dalam mendukung implementasi konsep Smart Factory dan Industry 4.0.
- e) Modul Data Logging dapat dikembangkan menjadi sistem analitik berbasis Big Data dan Artificial Intelligence, sehingga data historis hasil pengujian tidak hanya digunakan sebagai dokumentasi, tetapi juga sebagai dasar untuk penerapan predictive maintenance, risk assessment, serta analisis tren kondisi peralatan secara berkelanjutan.
- f) Penelitian selanjutnya juga dapat mengembangkan sistem menjadi Adaptive Safety Interlock System, yaitu sistem yang mampu menyesuaikan parameter

keselamatan secara dinamis berdasarkan kondisi operasional, karakteristik objek yang diuji, maupun hasil pembelajaran (machine learning) dari data historis. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan fleksibilitas dan efektivitas sistem dalam menghadapi berbagai skenario industri yang berbeda.

Daftar Pustaka

- [1] A. C. Chidi, O. F. Kelechi, N. Chukwuchekwa, A. Chika, and N. H. Ifeanyi, "Design and Construction of An Integrated Smart Surveillance Network Using Perimeter Intrusion Dictation (PID) and AI Cameras".
- [2] R. Muwardi and R. R. Adisaputro, "Design Sistem Keamanan Pintu Menggunakan Face Detection," *JTE*, vol. 12, no. 3, p. 120, Oct. 2021, doi: 10.22441/jte.2021.v12i3.004.
- [3] M. I. Maulana, I Gede Putu Wirarama Wedashwara, and Ariyan Zubaidi, "Deteksi Pelanggaran Social Distancing Menggunakan Raspberry Pi Kamera Berbasis IOT: Social Distancing Violations Detection Using Iot-Based Raspberry Pi Camera," *J-Cosine*, vol. 6, no. 1, pp. 39–46, June 2022, doi: 10.29303/jcosine.v6i1.417.
- [4] Q. M. Rajpoot, "Enhancing Security and Privacy in Large-Scale Video Surveillance through Role-Oriented Access Control Mechanism".
- [5] S. Ardiansyah and M. R. Fachri, "Hospital Sterilization Room Door Interlock System Prototype Using Electric Contactors".
- [6] Y. Lu, "Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6, pp. 1–10, June 2017, doi: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
- [7] R. Sholehurrohman, K. Muludi, and J. Triloka, "OPTIMIZING TRANSPORTATION SURVEILLANCE WITH YOLOV5: DETECTION AND CLASSIFICATION OF VEHICLE LICENSE PLATE COLORS," *jitk*, vol. 10, no. 4, pp. 812–820, May 2025, doi: 10.33480/jitk.v10i4.6260.
- [8] A. I. Mubarak and A. Nurahmawati, "PENAMBAHAN PROGRAM INTERLOCK DARI SENSOR VIBRASI KE DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM CEMENT MILL TUBAN PLANT SEBAGAI SAFETY DEVICE," vol. 3, 2025.
- [9] M. A. Hidayat, N. L. Husni, and F. Damsi, "Pendeteksi Banjir Dengan Image Processing Berbasis Convolutional Neural Network (CNN) pada Kamera Pengawas: Image Processing Based Flood Detector Using Convolutional Neural Network (CNN) Within Surveillance Camera," *MALCOM*, vol. 2, no. 2, pp. 10–18, Aug. 2022, doi: 10.57152/malcom.v2i2.382.
- [10] Yovi Apridiansyah, A. Wijaya, Pahrizal, Rozali Toyib, and Arif Setiawan, "Pengolahan Citra Berbasis Video Proccesing dengan Metode Frame Difference untuk Deteksi Gerak," *J. Appl. Comput. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 81–89, June 2024, doi: 10.52158/jacost.v5i1.790.
- [11] Z. A. Julhijah, B. Setiadi, and A. Binarto, "Pengukur Suhu Tubuh Otomatis Berbasis Identifikasi Objek Menggunakan Metode Image Processing," *IRWNS*, vol. 13, no. 01, pp. 813–819, July 2022, doi: 10.35313/irwns.v13i01.4172.
- [12] M. Ghifari, H. M. Ridlwan, and B. Siloan, "Perancangan Instalasi Oil Flowmeter dengan Sistem Interlock pada Separator 562-SR01 di PT Solusi Bangun Andalas," 2022.
- [13] J. Jardan, Kevin, and Michael Owen, "Perancangan Smart Door Berbasis ESP32-WROVER dengan Sistem Notifikasi Melalui Aplikasi Blynk," *telcomatics*, vol. 9, no. 2, pp. 40–46, Dec. 2024, doi: 10.37253/telcomatics.v9i2.10096.
- [14] M. P. Pangestu, S. Wiyono, and D. I. Af'idah, "Platform Ujian Online Berbasis Pendeteksi Gerakan Kecurangan Menggunakan Kamera," *Jurnal Informatika*,

- Manajemen dan Teknologi*, vol. 26, no. 1, pp. 55–62, May 2024, doi: 10.23969/infomatek.v26i1.11208.
- [15] V. I. Sitta, “PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG 2025,” *PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER*, 2025.
 - [16] F. Ferella, S. Paembonan, and H. Abduh, “PROTOTYPE SISTEM KONTROL RUMAH PINTAR MENGGUNAKAN KAMERA BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT),” *JITET*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.6025.
 - [17] A. Rahmadani, N. A. Windarko, and L. P. S. Raharja, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembapan serta Kendali Dua Heater pada Kubikel 20 kV Berbasis Sistem Informasi Geografis,” *JTE*, vol. 21, no. 2, p. 219, Dec. 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i02.p09.
 - [18] A. G. Nainggolan, M. Syahputri, N. Nahampun, M. Sibarani, and K. Putra, “SISTEM KEAMANAN LINGKUNGAN PERUMAHAN BERBASIS ANDROID MENGGUNAKAN SMART HOME CAMERA WIFI,” vol. 4, no. 01, 2025.
 - [19] M. Monita and H. Hendri, “Sistem Kontrol Rumah Pintar Menggunakan Kamera Berbasis IoT,” *JTEIN*, vol. 2, no. 1, pp. 107–112, May 2021, doi: 10.24036/jtein.v2i1.141.
 - [20] S. Kautsar, W. Suryaningsih, A. Bakri, B. Hariono, A. Brilliantina, and R. Wijaya, “Sistem Monitoring berbasis Desktop untuk Perangkat Mini Exhausting Pada Proses Pengalengan Ikan,” *jtim*, vol. 4, no. 1, pp. 47–53, May 2022, doi: 10.35746/jtim.v4i1.200.
 - [21] R. Samsinar, G. G. Aditya, D. Almanda, F. Fadlioni, F. Amrulloh, and A. I. Ramadhan, “Sistem Pendeteksi Kurir Menggunakan Smart Closed Circuit Television (CCTV) Berbasis Internet Of Things (IoT) dengan Media Komunikasi Bot Telegram (Studi Kasus : Rumah Indekost),” *RESISTOR*, vol. 6, no. 1, p. 47, May 2023, doi: 10.24853/resistor.6.1.47-54.
 - [22] N. H. Setiyawan, M. A. Hariyadi, and Y. M. Arif, “Sistem Pengawasan CCTV Pada ATM Secara Real-Time Berbasis Internet of Things,” vol. 5, no. 1, 2025.
 - [23] B. Yanto, B. Basorudin, S. Anwar, A. Lubis, and K. Karmi, “Smart Home Monitoring Pintu Rumah Dengan Identifikasi Wajah Menerapkan Camera ESP32 Berbasis IoT,” *SISFOKOM*, vol. 11, no. 1, pp. 53–59, Mar. 2022, doi: 10.32736/sisfokom.v11i1.1180.
 - [24] P. A. Kurniawan and A. H. Mujiyanto, “SMART LOCK DOOR MENGGUNAKAN FACE RECOGNITION DENGAN METODE VIOLA-JONES BERBASIS INTERNET of THINGS (IoT)”.
 - [25] A. Hasibuan, N. Sutrisno, and S. P. Nasution, “SMART Manufacturing System : Sebuah Solusi Teknologi Manufaktur Proses Menuju Industri 4.0,” 2024.