

PENGEMBANGAN SISTEM PROTEKSI ASET MEDIS DENGAN FITUR DETEKSI ANOMALI SUHU BERBASIS AUTOENCODER DAN SUMBER KEBOCORAN AIR BERBASIS *DECISION TREE*

ZAH DAN FAQIH RAHBANI



**TEKNOLOGI REKAYASA KOMPUTER
SEKOLAH VOKASI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



PERNYATAAN MENGENAI LAPORAN AKHIR DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa laporan akhir dengan judul “Pengembangan Sistem Proteksi Aset Medis dengan Fitur Deteksi Anomali Suhu Berbasis *Autoencoder* dan Sumber Kebocoran Air Berbasis *Decision Tree*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir laporan akhir ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Zahdan Faqih Rahbani
J0404221026



ABSTRAK

ZAHDAN FAQIH RAHBANI. Pengembangan Sistem Proteksi Aset Medis dengan Fitur Deteksi Anomali Suhu Berbasis *Autoencoder* dan Sumber Kebocoran Air Berbasis *Decision Tree*. Dibimbing oleh FALDIENA MARCELITA.

Sistem peringatan dini pada gudang PT Synergy Dua Kawan Sejati sebelumnya hanya mengandalkan ambang batas suhu rata-rata statis dan deteksi genangan air secara biner, sehingga rentan menghasilkan alarm palsu akibat fluktuasi suhu *ambient* harian dan gagal mendeteksi anomali termal lokal berskala kecil seperti *hotspot* korsleting. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem proteksi aset medis melalui integrasi kecerdasan buatan pada arsitektur *Internet of Things* berbasis ESP32-S3, mencakup deteksi anomali suhu menggunakan *Convolutional Autoencoder* dan klasifikasi sumber kebocoran air menggunakan *Decision Tree*. Pengujian dilaksanakan pada lingkungan simulasi Tingkat Kesiapterapan Teknologi Level 6 menggunakan tiga tumpukan kardus berdimensi 35×26,5×96 cm yang merepresentasikan produk medis baru dalam kemasan aslinya, sesuai kondisi penyimpanan aktual gudang. Data termal dari sensor MLX90640 berupa matriks 32×24 piksel dikumpulkan selama 4 hari 6 jam menghasilkan 24.179 *frame*, diproses menggunakan *Zero-Mean Normalization*, dan digunakan untuk melatih model *Autoencoder* berkapasitas ringan (3.217 parameter) selama 50 *epoch* dengan ambang batas ganda berbasis kaidah tiga-sigma. Klasifikasi sumber genangan air dilakukan dengan mengintegrasikan pembacaan sensor K-0135 dan data cuaca *real-time* dari OpenWeatherMap API untuk membedakan kebocoran atap saat hujan dan kebocoran pipa internal saat cuaca cerah. Hasil pengujian menunjukkan model *Autoencoder* berhasil mereduksi alarm palsu sebesar 65% dan meningkatkan sensitivitas deteksi anomali lokal sebesar 100% dibandingkan sistem berbasis ambang batas statis, sementara logika *Decision Tree* berhasil mengklasifikasikan sumber kebocoran air dengan akurasi 100% dari 10 skenario pengujian. Seluruh komponen telah terintegrasi ke dalam *dashboard* web dengan visualisasi *heatmap* termal *real-time* dan notifikasi *Telegram Bot* disertai foto bukti, sehingga sistem ini terbukti layak diterapkan untuk mendukung manajemen risiko aset medis di lingkungan gudang.

Kata kunci: *Autoencoder*, *Decision Tree*, deteksi anomali, *Internet of Things*, klasifikasi sumber kebocoran air.



ABSTRACT

ZAHDAN FAQIH RAHBANI. Development of a Medical Asset Protection System with an Autoencoder-Based Temperature Anomaly Detection Feature and Decision Tree-Based Water Leakage Source Classification. Supervised by FALDIENA MARCELITA.

The early warning system previously deployed at PT Synergy Dua Kawan Sejati's warehouse relied solely on a static average temperature threshold and binary water detection, making it prone to false alarms from daily ambient temperature fluctuations and unable to detect small-scale local thermal anomalies such as short-circuit hotspots. This research aims to develop a medical asset protection system through the integration of artificial intelligence into an ESP32-S3-based Internet of Things architecture, encompassing temperature anomaly detection using a Convolutional Autoencoder and water leakage source classification using a Decision Tree. Testing was conducted in a Technology Readiness Level 6 simulation environment using three stacked cardboard boxes with total dimensions of 35×26.5×96 cm, representing newly packaged medical products in their original packaging, consistent with the actual warehouse storage condition. Thermal data from the MLX90640 sensor in the form of a 32×24 pixel matrix were collected over 4 days and 6 hours, yielding 24,179 frames, which were processed using Zero-Mean Normalization and used to train a lightweight Autoencoder model (3,217 parameters) for 50 epochs with a dual threshold based on the three-sigma rule. Water leakage source classification was performed by integrating readings from the K-0135 sensor with real-time weather data from the OpenWeatherMap API to distinguish between roof leaks during rain and internal pipe leaks under clear weather. Testing results showed that the Autoencoder model successfully reduced false alarms by 65% and increased local anomaly detection sensitivity by 100% compared to the previous static threshold system, while the Decision Tree logic achieved 100% accuracy in classifying water leakage sources across 10 test scenarios. All components were successfully integrated into a web dashboard featuring real-time thermal heatmap visualization and Telegram Bot notifications with photographic evidence, demonstrating that the system is feasible for supporting medical asset risk management in warehouse environments.

Keywords: Autoencoder, anomaly detection, Decision Tree, Internet of Things, water leakage source classification.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



PENGEMBANGAN SISTEM PROTEKSI ASET MEDIS DENGAN FITUR DETEKSI ANOMALI SUHU BERBASIS *AUTOENCODER* DAN SUMBER KEBOCORAN AIR BERBASIS *DECISION TREE*

ZAHDAN FAQIH RAHBANI

Laporan Akhir
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Terapan pada
Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer

**TEKNOLOGI REKAYASA KOMPUTER
SEKOLAH VOKASI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji pada ujian Laporan Akhir: Prof. Dr. Ir. Sri Nurdiati, M.Sc.

Perpustakaan IPB University

Judul Laporan : Pengembangan Sistem Proteksi Aset Medis dengan Fitur Deteksi Anomali Suhu Berbasis *Autoencoder* dan Sumber Kebocoran Air Berbasis *Decision Tree*

Nama : Zahdan Faqih Rahbani
NIM : J0404221026

Disetujui oleh

**Pembimbing :
Faldiena Marcelita, S.T., M.Kom.**



Diketahui oleh

**Ketua Program Studi:
Dr. Inna Novianty, S.Si., M.Si.
NPI 201811198611192014**

**Dekan Sekolah Vokasi:
Dr. Ir. Aceng Hidayat, M.T.
NIP 196607171992031003**



**Tanggal Ujian:
21 Juli 2026**

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga laporan tugas akhir ini berhasil diselesaikan. Laporan tugas akhir ini berjudul "Pengembangan Sistem Proteksi Aset Medis dengan Fitur Deteksi Anomali Suhu Berbasis *Autoencoder* dan Sumber Kebocoran Air Berbasis *Decision Tree*". Penelitian ini merupakan pengembangan lanjutan dari proyek yang telah dirintis penulis selama kegiatan magang industri di PT Synergy Dua Kawan Sejati, Cikupa, Kabupaten Tangerang, pada periode Agustus 2025 hingga Desember 2025. Tahap pengembangan perangkat lunak, pelatihan model kecerdasan buatan, dan penyusunan laporan dilaksanakan di Perumahan Grand Riscon Padjajaran, Kabupaten Bogor, pada periode Januari 2026 hingga April 2026.

Tujuan penulisan laporan tugas akhir ini adalah untuk memenuhi persyaratan kelulusan Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer, Sekolah Vokasi Institut Pertanian Bogor. Menyadari bahwa penyusunan laporan ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Faldiena Marcelita, S.T., M.Kom., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, ilmu, dan masukan yang sangat berharga selama proses penelitian dan penyusunan laporan ini. Terima kasih kepada Ibu Dr. Inna Novianty, S.Si., M.Si., selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer, Sekolah Vokasi Institut Pertanian Bogor. Terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Aceng Hidayat, M.T., selaku Dekan Sekolah Vokasi Institut Pertanian Bogor. Terima kasih kepada seluruh jajaran manajemen dan staf PT Synergy Dua Kawan Sejati yang telah memberikan izin penelitian, memfasilitasi pengambilan data di lapangan, serta memberikan informasi operasional yang sangat dibutuhkan dalam penelitian ini. Ayah, ibu, dan seluruh keluarga tercinta yang senantiasa memberikan dukungan moral, doa, dan kasih sayang yang tak ternilai selama penulis menempuh studi di Sekolah Vokasi Institut Pertanian Bogor. Seluruh teman-teman mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer angkatan 59 atas kebersamaan, semangat, dan dukungannya selama ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang *Internet of Things* dan kecerdasan buatan, khususnya dalam penerapannya untuk proteksi aset di lingkungan industri kesehatan. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Bogor, Juli 2026

Zahdan Faqih Rahbani

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Internet of Things (<i>IoT</i>) dalam Monitoring Lingkungan Gudang	5
2.2 Sensor MLX90640 untuk Pencitraan Termal	6
2.3 Sensor K-0135 untuk Deteksi Genangan Air	7
2.4 Protokol MQTT dalam Arsitektur <i>IoT</i>	9
2.5 Mikrokontroler ESP32-S3	10
2.6 Notifikasi Melalui Telegram	11
2.7 <i>Autoencoder (Unsupervised Learning)</i>	13
2.8 <i>Decision Tree</i> untuk Klasifikasi Berbasis Aturan	14
2.9 Proteksi Aset Medis dalam Penyimpanan	15
2.10 OpenWeatherMap API	16
III METODE	18
3.1 Lokasi dan Waktu Proyek	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.3 Teknik Pengumpulan Data	20
3.4 Analisis Data	20
3.5 Prosedur Kerja	24
3.6 Perancangan Sistem	27
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Implementasi Sistem Pada Lingkungan Simulasi (TKT Level 6)	41
4.2 Hasil Penyolderan dan Pemasangan Komponen Pada <i>Casing</i>	42
4.3 Pengumpulan dan Pra-Pemrosesan Data Sensor	45
4.4 Pelatihan Model <i>Autoencoder</i> dan Penentuan Ambang Batas	45
4.5 Integrasi Sistem Web <i>Dashboard Real-time</i>	47
4.6 Notifikasi Telegram	49
4.7 Validasi Hasil Pengujian dan Kinerja Perbandingan	51
V SIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Simpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	61
RIWAYAT HIDUP	74



DAFTAR TABEL

1	Daftar Perangkat Keras	18
2	Daftar Kebutuhan Perangkat Lunak	19
3	Simulasi Perhitungan Loss 1 Frame (768 Piksel)	23
4	Logika Klasifikasi Sumber Kebocoran Air	26
5	Distribusi Konfigurasi Daya Sistem	28
6	Konfigurasi Koneksi Pin Sinyal ESP32-S3	29
7	Perbandingan Sistem Generasi Pertama dan Generasi Kedua	52
8	Hasil Pengujian Deteksi Sumber Panas Lokal	53
9	Hasil Pengujian <i>False Alarm</i> Pada Siang Hari	54
10	Hasil Pengujian Deteksi Genangan Air dan Sumber Kebocoran	55
11	Rekapitulasi Lengkap Seluruh Metrik Pengujian	57

DAFTAR GAMBAR

1	MLX90640	7
2	K-0135	8
3	Protokol MQTT	9
4	ESP32-S3	11
5	Telegram	12
6	<i>Autoencoder</i>	13
7	Algoritma <i>Decision Tree</i>	15
8	OpenWeatherMap	17
9	Diagram Alir Tahap Pelatihan Model <i>Autoencoder</i>	23
10	Blok Diagram Sistem	27
11	Skematik Rangkaian Elektronik	28
12	Desain 3D <i>Casing</i> dan Tripod	31
13	Tampilan Sisi Depan Keseluruhan Sistem	32
14	Tampilan Sisi Kanan Keseluruhan Sistem	32
15	Tampilan Sisi Kiri Keseluruhan Sistem	33
16	Tampilan Sisi Belakang Keseluruhan Sistem	33
17	Tampilan Sisi Atas Keseluruhan Sistem	34
18	Tampilan Sisi Bawah Keseluruhan Sistem	34
19	Arsitektur Sistem	35
20	Diagram Alir Kerja Sistem	39
21	Penempatan Sistem Pada Lingkungan Tiruan	41
22	Tumpukan Kardus Sedemikian Rupa Dengan Aset Gudang	42
23	Hasil Penyolderan Pada PCB	43
24	Kepala <i>Casing</i> Sistem Berisi Sensor, Modem, dan Mikrokontroler	43
25	UPS Sistem Sebagai Daya Cadangan	44
26	<i>Casing</i> Kaki Sistem Berisi Water Level Sensor K0135	44
27	Foto Alat Dari Sisi Depan	45
28	Grafik Pembelajaran Model <i>Autoencoder</i>	46
29	Halaman <i>Login Website</i>	48



30	Tampilan Tangkapan Foto dan <i>Heatmap</i>	48
31	Tampilan Grafik Sensor dan <i>Log</i> Aktivitas	49
32	Pengaturan Pergantian <i>Password</i> dan Sesi <i>Login</i> Aktif	49
33	Notifikasi Telegram Terdeteksi Anomali	50
34	Notifikasi Telegram Genangan Air	51
35	Pengujian Pada Kertas Yang Dibakar	54
36	Pengujian Menuangkan Air Disekitar <i>Water Level Sensor</i>	57

DAFTAR LAMPIRAN

1	Kode Program Pelatihan Model <i>Autoencoder</i>	63
2	Kode Program ESP32-S3	65
3	Sebagian Tampilan <i>Dataset</i> Suhu Mentah CSV	69
4	Panduan Penggunaan	70
5	Analisis Kebutuhan Daya	72
6	Dokumentasi Dengan Pihak PT Synergy Dua Kawan Sejati	73
7	Gudang PT Synergy Dua Kawan Sejati	73

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Synergy Dua Kawan Sejati, sebagai distributor alat kesehatan dan medis non-farmasi, memiliki tanggung jawab besar dalam menjaga kualitas aset operasionalnya. Penyimpanan aset dan peralatan medis memerlukan standar pemantauan lingkungan yang sangat ketat dan presisi. Berdasarkan observasi dan wawancara langsung dengan penanggung jawab operasional gudang, ditemukan adanya kerentanan nyata terhadap kondisi kebocoran atap, paparan suhu berlebih, serta risiko kehilangan aset akibat tindak pencurian (PT Synergy Dua Kawan Sejati 2025). Peralatan presisi tinggi seperti alat *monitoring* suhu dan pemantau detak jantung pasien sangat rentan mengalami penurunan akurasi kalibrasi apabila terpapar suhu panas yang berlebih, sebagaimana dibuktikan dalam karakterisasi termal sensor MLX90640 yang menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap perubahan temperatur lingkungan (Firmansyah & Indrasari 2025). Selain itu, bahan medis habis pakai seperti tisu medis, kain linen, kasur medis, dan masker bedah memiliki dua jalur kerentanan terhadap kelembapan. Pertama, paparan air secara langsung akibat kebocoran atap atau genangan di lantai gudang dapat memicu pertumbuhan spora jamur dan korosi secara cepat pada area yang terdampak. Kedua, tingkat kelembapan udara ambient yang tinggi meskipun tanpa disertai genangan atau kebocoran yang terlihat kasat mata juga dapat memicu degradasi serupa secara bertahap pada seluruh area penyimpanan, sehingga membuat barang tersebut tidak steril, melanggar regulasi kesehatan, dan menyebabkan kerugian finansial yang signifikan, termasuk mempercepat laju korosi pada material logam medis akibat kelembapan yang tidak terkontrol (Cahyono et al. 2023). Lebih jauh, kondisi penyimpanan fisik yang tidak terpantau dengan baik berpotensi menimbulkan risiko kehilangan atau kerusakan aset, dan teknologi pencitraan termal telah terbukti mampu mendeteksi keberadaan objek secara otomatis dalam ruang tertutup sebagai solusi pengawasan aset (Chidurala & Li 2022).

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh penulis selama masa magang industri, telah dibangun sebuah purwarupa awal "Sistem Peringatan Dini Termal dan Genangan Air". Sistem tersebut mampu mengirimkan data suhu dan kelembapan secara *real-time* ke sebuah *dashboard* berbasis web serta mengirimkan notifikasi Telegram saat ambang batas terlampaui. Namun, hasil evaluasi operasional mengungkapkan bahwa sistem tersebut memiliki kelemahan mendasar pada logika pengambil keputusannya. Deteksi termal yang menggunakan sensor MLX90640BAB hanya bergantung pada pengaturan ambang batas nilai rata-rata suhu mutlak (*static threshold*). Pendekatan linier ini sangat rentan menghasilkan alarm palsu (*false alarm*) saat terjadi fluktuasi suhu ruangan yang wajar akibat perubahan cuaca dari siang ke malam (Behrouzi et al. 2023). Lebih parahnya, sistem gagal mendeteksi anomali berskala kecil seperti *Hotspot* akibat korsleting awal kabel atau intrusi manusia karena gangguan kecil tersebut tidak cukup kuat untuk menaikkan angka rata-rata suhu seluruh ruangan. Ketidadaan informasi spesifik mengenai sumber anomali ini juga memperlambat proses investigasi dan penanganan oleh teknisi (Wardana et al. 2022). Selain isu termal, sistem deteksi genangan air sebelumnya hanya menggunakan sensor *Water Level* secara biner (basah atau kering). Sistem belum mampu memberikan analisis cerdas terkait

sumber penyebab genangan tersebut. Padahal, rekam jejak historis menunjukkan bahwa gudang pernah mengalami insiden kebocoran atap saat hujan lebat maupun kebocoran pipa internal yang berulang (PT Synergy Dua Kawan Sejati 2025). Ketiadaan informasi analitik ini menyebabkan inefisiensi, di mana teknisi harus menghabiskan waktu investigasi sebelum dapat melakukan tindakan preventif (Saputra *et al.* 2022). Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan melalui penerapan kecerdasan buatan (*Machine Learning*).

Pendekatan *Unsupervised Learning* menggunakan arsitektur *Convolutional Autoencoder* diterapkan untuk mengubah cara kerja sensor MLX90640. Sistem tidak lagi memantau suhu rata-rata mutlak, melainkan memantau deviasi topologi pola penyebaran panas (Tilak *et al.* 2020). Model diajarkan untuk mengenali kondisi spasial normal gudang setiap kegagalan model dalam merekonstruksi citra akan diidentifikasi sebagai anomali. Di sisi lain, algoritma *Decision Tree* diimplementasikan untuk mengintegrasikan nilai sensor genangan dengan data meteorologi terkini dari OpenWeatherMap API, sehingga sistem mampu mengklasifikasikan apakah genangan berasal dari atap bocor atau pipa internal yang pecah. Tahap validasi lapangan secara langsung di gudang operasional PT Synergy Dua Kawan Sejati terkendala oleh faktor logistik dan keamanan operasional. Oleh karena itu, berdasarkan kerangka Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) yang merujuk pada standar ISO 16290:2013, penelitian ini dilaksanakan pada TKT Level 6, yaitu demonstrasi dan validasi komponen sistem dalam lingkungan yang disimulasikan dan relevan (Mankins 2009). Pengujian dilaksanakan menggunakan susunan tiga tumpukan kardus berukuran total 35×26,5×96 cm yang disusun menyerupai kondisi penyimpanan aset medis di gudang, dilengkapi dengan sumber panas terkontrol untuk mereplikasi skenario *Hotspot* dan simulasi genangan air untuk mereplikasi kondisi kebocoran. Dengan demikian, penelitian ini melakukan transformasi metodologis dari sistem reaktif berbasis *threshold* menjadi sistem prediktif-kontekstual berbasis kecerdasan buatan yang divalidasi secara teliti sebelum direkomendasikan untuk *deployment* lapangan sesungguhnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan penelitian dirumuskan sebagai berikut:

- 1) Bagaimana merancang bangun arsitektur *Internet of Things* (IoT) berbasis ESP32-S3 yang andal dengan sistem kelistrikan terdedikasi untuk mengakuisisi matriks data termal MLX90640 dan sensor air K-0135 pada lingkungan simulasi TKT Level 6?
- 2) Bagaimana efektivitas teknik pra-pemrosesan *Zero-Mean Normalization* dan model *Convolutional Autoencoder* dalam mereduksi *false alarm* akibat fluktuasi cuaca serta meningkatkan sensitivitas deteksi anomali lokal?
- 3) Bagaimana algoritma *Decision Tree* yang diintegrasikan dengan OpenWeatherMap API mampu mengklasifikasikan sumber kebocoran air secara kontekstual?
- 4) Bagaimana mengintegrasikan hasil deteksi anomali dan klasifikasi ke dalam *dashboard* web dengan fitur notifikasi Telegram dan pemicuan kamera otomatis?

1.3 Tujuan

Sejalan dengan rumusan masalah yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk:

- 1) Merancang dan membangun arsitektur sistem IoT terintegrasi untuk akuisisi data *real-time* dan mendukung inferensi *Machine Learning*, meliputi konfigurasi perangkat keras, infrastruktur *cloud*, dan *Backend*.
- 2) Mengimplementasikan dan melatih model *Autoencoder* untuk mendeteksi anomali pola pencitraan termal dari data sensor MLX90640BAB secara efektif di gudang penyimpanan aset medis.
- 3) Mengimplementasikan *Decision Tree* untuk mengklasifikasikan sumber kebocoran air berdasarkan data sensor K-0135 dan integrasi data cuaca eksternal (*real-time*).
- 4) Mengintegrasikan seluruh komponen ke dalam *dashboard* web yang menyediakan visualisasi *real-time*, notifikasi Telegram, dan pemicuan kamera otomatis saat anomali terdeteksi.

1.4 Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Bagi PT Synergy Dua Kawan Sejati: memberikan solusi deteksi dini kebocoran dan suhu berlebih secara otomatis, sehingga mengurangi kerugian akibat kerusakan aset medis.
- 2) Bagi dunia akademik: menjadi referensi penerapan *Machine Learning* tidak terawasi (*unsupervised*) dan berbasis aturan dalam sistem IoT untuk proteksi aset kritis.
- 3) Memberikan peringatan dini yang lebih akurat dan informatif melalui implementasi *Machine Learning*, termasuk deteksi pola anomali suhu menggunakan *Autoencoder* dan klasifikasi sumber kebocoran air berbasis *Decision Tree* dengan data cuaca.
- 4) Menyajikan studi kasus penerapan *Autoencoder* untuk analisis anomali pada data pencitraan termal *real-time* dari sensor MLX90640BAB dalam konteks pemantauan lingkungan gudang.
- 5) Memberikan contoh implementasi *Decision Tree* untuk klasifikasi risiko berdasarkan integrasi data sensor level air (K-0135) dan data kondisi cuaca eksternal (*real-time*).

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini difokuskan pada pengembangan sistem proteksi berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk aset medis seperti peralatan elektronik, linen, kasur di lingkungan gudang, dengan studi kasus awal di PT Synergy Dua Kawan Sejati. Ruang lingkup penelitian ini meliputi:

- 1) Pengujian dilakukan secara empiris pada lingkungan simulasi (TKT Level 6) yang merepresentasikan tumpukan aset medis.
- 2) Perancangan dan Pembangunan Perangkat Keras: mencakup integrasi mikrokontroler ESP32-S3, sensor pencitraan termal MLX90640BAB (antarmuka I2C), sensor level air K-0135 (analog), dan modul kamera OV2640 menjadi satu unit purwarupa (*node* pemantauan).

- 3) Implementasi *Machine Learning*: mencakup melatih model *Autoencoder* menggunakan TensorFlow untuk deteksi anomali pola pencitraan termal dari data MLX90640BAB dan *Decision Tree* untuk klasifikasi sumber kebocoran air berdasarkan data sensor K-0135 dan data cuaca eksternal.
- 4) Pengujian dan Evaluasi: melakukan pengujian fungsionalitas sistem secara keseluruhan dan mengevaluasi kinerja model *Machine Learning* berdasarkan data simulasi atau data uji terbatas. Melakukan perbandingan konseptual atau simulasi kinerja sistem yang dikembangkan ini dengan sistem berbasis *threshold* sederhana.

Selain ruang lingkup di atas, penelitian ini juga memiliki beberapa batasan yang perlu menjadi pertimbangan dalam menginterpretasikan hasil yang diperoleh. *Field of View* (FOV) sensor MLX90640 terbatas pada $55^{\circ} \times 35^{\circ}$, sehingga hanya mampu memantau tiga sisi objek secara simultan (atas, kiri, dan kanan) dari satu titik pemasangan untuk gudang berskala besar dengan konfigurasi tumpukan aset yang lebih kompleks dan tersebar, diperlukan penambahan jumlah unit sensor guna mencakup seluruh area pemantauan secara menyeluruh. Selain itu, klaim akurasi 100% pada pengujian deteksi anomali termal maupun klasifikasi sumber kebocoran air bersifat kondisional, diperoleh dari 10 kali pengujian pada lingkungan simulasi TKT Level 6 yang terkontrol, sehingga performa sistem pada kondisi operasional nyata dengan variasi lingkungan yang lebih kompleks, durasi pengujian lebih panjang, dan jumlah sampel yang lebih besar masih perlu divalidasi lebih lanjut sebelum sistem direkomendasikan untuk *deployment* langsung di gudang operasional. Terakhir, faktor kelembapan udara belum dideteksi oleh sistem saat ini, meskipun berpotensi menjadi penyebab pertumbuhan jamur dan korosi pada aset medis di lingkungan gudang tropis.

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Internet of Things (IoT) dalam Monitoring Lingkungan Gudang

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang memungkinkan perangkat fisik untuk saling terhubung dan bertukar data melalui internet secara otomatis tanpa campur tangan manusia (Firmansyah dan Indrasari 2025). Konsep ini menggabungkan sensor fisik, jaringan komunikasi nirkabel, dan platform komputasi awan ke dalam satu ekosistem yang saling terintegrasi, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara kontinu dan otonom. Secara arsitektural, sistem IoT umumnya terbagi menjadi tiga lapisan utama: lapisan persepsi (*perception layer*) yang terdiri dari sensor dan aktuator sebagai pengumpul data, lapisan jaringan (*network layer*) yang mengelola transmisi data antar perangkat, serta lapisan aplikasi (*application layer*) yang memproses, menganalisis, dan memvisualisasikan informasi bagi pengguna akhir (Colak *et al.* 2016). Dalam konteks *monitoring* lingkungan gudang, IoT memberikan solusi yang sangat efektif untuk mendeteksi perubahan suhu, kelembapan, dan keberadaan genangan air secara *real-time*. Sistem IoT menggantikan metode inspeksi manual yang rentan terhadap kelalaian manusia dan tidak mampu memberikan respons cepat terhadap insiden yang terjadi di luar jam kerja (Colak *et al.* 2016).

Pentingnya pemantauan kondisi lingkungan penyimpanan peralatan medis secara konsisten telah ditegaskan dalam penelitian manajemen aset fasilitas kesehatan, di mana paparan suhu berlebih dan kelembapan yang tidak terpantau terbukti dapat menurunkan keandalan dan akurasi alat kesehatan secara signifikan (Cahyono *et al.* 2023). Dari sisi teknis, implementasi IoT untuk pemantauan gudang memanfaatkan mikrokontroler berkemampuan tinggi sebagai *edge node* untuk mengakuisisi dan mentransmisikan data sensor. Protokol komunikasi ringan seperti MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) menjadi pilihan utama dalam implementasi IoT industri karena sifatnya yang asinkronus, hemat *bandwidth*, dan mendukung mekanisme *publish-subscribe* yang cocok untuk topologi perangkat majemuk (Habibi *et al.* 2018). Data yang dikirimkan melalui protokol ini kemudian diproses di sisi server *cloud* dan disajikan melalui *dashboard* web interaktif untuk pemantauan jarak jauh secara *real-time*. Pendekatan ini sangat relevan untuk sektor logistik alat kesehatan, di mana keamanan dan integritas aset medis yang berkelanjutan menjadi prioritas operasional utama.

Penelitian terkini telah mendemonstrasikan efektivitas IoT berbasis sensor termal dalam lingkungan industri. Firmansyah dan Indrasari (2025) membuktikan bahwa sensor termal MLX90640 yang diintegrasikan dengan sistem IoT mampu melakukan pemantauan suhu secara *real-time* dengan metode karakterisasi regresi linier yang menghasilkan akurasi pengukuran yang andal. Senada dengan hal tersebut, Chidurala dan Li (2022) menunjukkan bahwa sensor pencitraan termal resolusi rendah dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek bergerak secara otomatis, membuka peluang penerapannya tidak hanya untuk pemantauan suhu, tetapi juga untuk keamanan aset dan deteksi intrusi dalam ruang penyimpanan tertutup. Dalam penelitian ini, sistem IoT yang dikembangkan mengimplementasikan arsitektur *end-to-end* dengan mikrokontroler ESP32-S3 sebagai *edge node* yang mengakuisisi data dari sensor pencitraan termal MLX90640 (resolusi 32×24 piksel), sensor genangan air K-0135, dan modul

kamera OV2640 sebagai verifikasi visual. Seluruh data ditransmisikan melalui protokol MQTT menuju *Backend* server berbasis Node.js yang mengeksekusi model kecerdasan buatan, menyimpan log historis ke basis data PostgreSQL Supabase, serta mengirimkan peringatan dini secara otomatis melalui *Telegram Bot*. Dengan demikian, sistem ini mewujudkan paradigma *Smart Monitoring* yang tidak hanya mampu mendeteksi, tetapi juga menginterpretasikan anomali secara kontekstual sesuai kondisi lingkungan sekitar gudang.

2.2 Sensor MLX90640 untuk Pencitraan Termal

Sensor MLX90640 merupakan sensor *thermal array* beresolusi 32×24 piksel yang dikembangkan oleh Melexis dan mampu menghasilkan peta distribusi suhu permukaan objek tanpa kontak langsung (*contactless*). Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip deteksi radiasi inframerah yang dipancarkan secara alami oleh semua benda yang memiliki suhu di atas nol mutlak (0 Kelvin). Setiap elemen piksel pada *array* sensor berfungsi sebagai termopil (*thermopile*) yang mengonversi energi radiasi inframerah yang diterima menjadi sinyal tegangan listrik yang sebanding dengan suhu permukaan objek yang dipantau. Sinyal tersebut kemudian diproses secara internal oleh sirkuit pengkondisi sinyal (*signal conditioning circuit*) bawaan sensor dan dikeluarkan sebagai nilai suhu dalam satuan derajat Celsius melalui antarmuka komunikasi I2C.

Dengan resolusi 32×24 piksel, sensor MLX90640 menghasilkan total 768 nilai suhu per *frame* yang secara kolektif membentuk matriks citra termal dua dimensi. Sensor ini memiliki akurasi pengukuran sebesar $\pm 1,5^\circ\text{C}$ pada rentang suhu objek 0°C hingga 80°C , dengan *Field of View* (FoV) sebesar $55^\circ \times 35^\circ$ yang memungkinkan pemantauan area yang cukup luas dari satu titik pemasangan (Firmansyah dan Indrasari 2025). Firmansyah dan Indrasari (2025) mengimplementasikan sensor MLX90640 pada sistem pemantauan termal berbasis IoT *real-time* dan membuktikan bahwa sensor ini mampu memberikan pembacaan suhu yang akurat dan konsisten pada lingkungan industri, bahkan ketika dikombinasikan dengan modul termokopel presisi tinggi sebagai pembanding kalibrasi. Salah satu tantangan teknis dalam pemanfaatan sensor MLX90640 adalah resolusi spasialnya yang relatif rendah (32×24 piksel) dibandingkan kamera termal konvensional. Untuk mengatasi keterbatasan ini, Darwis (2021) mengembangkan teknik interpolasi bikubik (*bicubic interpolation*) yang diterapkan pada data matriks suhu hasil pembacaan MLX90640 guna memperbesar dan memperhalus tampilan citra termal tanpa kehilangan informasi distribusi panas yang signifikan. Teknik ini memungkinkan visualisasi citra termal yang lebih detail dan mudah diinterpretasi oleh operator, di mana warna biru merepresentasikan suhu rendah dan warna merah merepresentasikan suhu tinggi pada peta warna (*colormap*) yang dihasilkan.



Gambar 1 MLX90640
(Sumber: docs.cirkitdesigner.com)

Dalam konteks deteksi anomali dan pemantauan keamanan, citra termal dari sensor MLX90640 terbukti mampu mendeteksi berbagai jenis anomali yang tidak terlihat secara visual. Chidurala dan Li (2022) membuktikan bahwa sensor pencitraan termal mampu mendeteksi keberadaan objek bergerak, termasuk manusia, berdasarkan perbedaan radiasi panas tubuh dengan suhu latar belakang lingkungan sekitarnya. Kemampuan ini sangat relevan untuk aplikasi deteksi intrusi pada gudang penyimpanan aset medis. Lebih jauh, Prinanto *et al.* (2022) mendemonstrasikan penerapan kamera termal yang dikombinasikan dengan jaringan saraf tiruan untuk mendiagnosis kondisi abnormal pada perangkat elektronik industri, di mana distribusi panas yang tidak normal pada komponen elektronik dapat diidentifikasi secara dini sebelum terjadi kegagalan total. Batubara *et al.* (2022) juga membuktikan bahwa integrasi kamera termal dengan sistem kecerdasan buatan mampu mendeteksi *Hotspot* pada instalasi kabel listrik sebagai langkah pencegahan kebakaran, yang secara langsung relevan dengan kebutuhan proteksi aset medis dalam penelitian ini. Pada penelitian ini, sensor MLX90640 dipasang pada penyangga tripod dengan ketinggian 154 cm dari permukaan lantai dan dimiringkan pada sudut 43° ke bawah. Konfigurasi ini dirancang agar FoV sensor sebesar $55^\circ \times 35^\circ$ mencakup tiga sisi objek simulasi secara simultan. Data matriks termal 32×24 piksel yang dihasilkan sensor dikirimkan ke mikrokontroler ESP32-S3 melalui antarmuka I2C setiap 10 detik, kemudian ditransmisikan ke peladen (*Backend*) melalui protokol MQTT untuk diproses lebih lanjut oleh model *Convolutional Autoencoder* guna mendeteksi anomali pola distribusi panas secara *real-time* (Firmansyah dan Indrasari 2025; Darwis 2021).

2.3 Sensor K-0135 untuk Deteksi Genangan Air

Sensor K-0135 merupakan sensor level air analog yang bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas listrik antara dua elektroda logam yang tersusun secara paralel pada permukaan papan sensornya. Prinsip kerja sensor ini memanfaatkan sifat air sebagai konduktor listrik lemah ketika permukaan elektroda sensor bersentuhan dengan air, molekul air yang mengandung ion terlarut membentuk jalur konduksi listrik di antara kedua elektroda tersebut. Semakin tinggi permukaan air yang menyentuh elektroda, semakin luas area konduksi yang terbentuk, sehingga hambatan listrik antara kedua elektroda semakin kecil dan arus yang mengalir semakin besar. Perubahan arus ini kemudian dikonversi menjadi tegangan analog yang dapat dibaca oleh pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada mikrokontroler.

Keluaran sensor K-0135 berupa sinyal tegangan analog yang nilainya berbanding lurus dengan ketinggian air yang menyentuh permukaan elektroda. Sinyal analog tersebut dikonversi oleh ADC 12-bit pada mikrokontroler ESP32-S3 menjadi nilai digital dalam rentang 0 hingga 4.095, di mana nilai 0 merepresentasikan kondisi kering (tidak ada air) dan nilai 4.095 merepresentasikan kondisi terendam penuh pada ketinggian maksimum sensor sebesar 48 mm. Resolusi ADC 12-bit ini memungkinkan sistem mendeteksi variasi ketinggian air sekecil apa pun secara bertahap, berbeda dengan sensor digital biner yang hanya mampu membedakan dua kondisi, yaitu basah atau kering (Saputra *et al.* 2022). Kemampuan pembacaan bertahap ini sangat penting dalam konteks pemantauan gudang aset medis, karena genangan air yang berbahaya bagi aset umumnya dimulai dari lapisan tipis yang tidak terlihat secara kasat mata sebelum berkembang menjadi genangan yang lebih dalam.



Gambar 2 K-0135
(Sumber: digiwarestore.com)

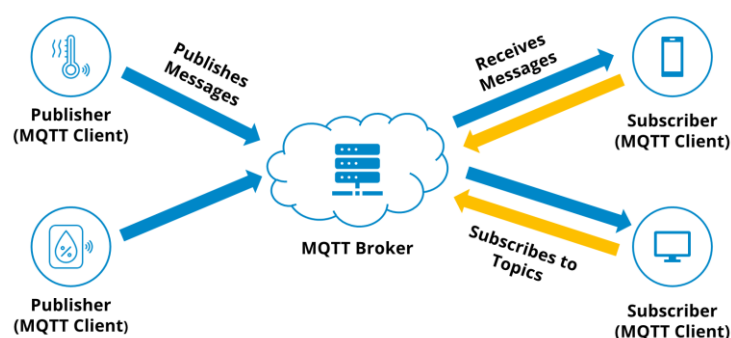
Dalam implementasi sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT, sensor level air analog terbukti efektif sebagai komponen deteksi dini kebocoran. Pratama *et al.* (2021) mengimplementasikan sensor level air pada sistem pemantauan IoT dan membuktikan bahwa pembacaan nilai analog secara kontinu memungkinkan sistem mendeteksi keberadaan cairan jauh lebih awal dibandingkan metode inspeksi visual manual. Pendekatan ini sangat relevan untuk lingkungan gudang yang tidak selalu diawasi secara langsung oleh personel sepanjang waktu. Lebih jauh, Firmansyah dan Syofian (2024) dalam perancangan sistem gudang cerdas berbasis IoT menegaskan bahwa integrasi sensor deteksi cairan dengan sistem notifikasi otomatis merupakan komponen kritis dalam manajemen risiko aset, karena waktu respons yang cepat terhadap insiden kebocoran secara langsung menentukan tingkat kerusakan aset yang dapat dicegah. Pada penelitian ini, sensor K-0135 dihubungkan ke pin GPIO 4 mikrokontroler ESP32-S3 yang dikonfigurasi sebagai saluran ADC dengan resolusi 12-bit.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini, nilai ADC sensor meningkat secara signifikan saat elektroda bersentuhan dengan air, dengan nilai tertinggi yang tercatat mencapai 4095 pada kondisi terendam penuh. Nilai ambang batas (*threshold*) sebesar 550 ditetapkan sebagai batas deteksi genangan aktif berdasarkan hasil kalibrasi empiris, di mana nilai tersebut terbukti mampu mendeteksi genangan dengan ketebalan sekitar 11 mm yang dinilai cukup untuk membahayakan aset medis yang tersimpan di lantai gudang (Habibi *et al.* 2018). Nilai pembacaan sensor ini selanjutnya digunakan sebagai salah satu variabel masukan dalam logika klasifikasi *Decision Tree* untuk menentukan sumber

penyebab genangan secara kontekstual, yakni dengan mengombinasikannya dengan data kondisi cuaca *real-time* dari OpenWeatherMap API (Saputra *et al.* 2022).

2.4 Protokol MQTT dalam Arsitektur IoT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) adalah protokol komunikasi berbasis model *publish-subscribe* yang dirancang secara khusus untuk perangkat dengan sumber daya komputasi terbatas dan kondisi jaringan dengan *bandwidth* rendah serta latensi tinggi (Habibi *et al.* 2018). Protokol ini dikembangkan di atas lapisan TCP/IP dan beroperasi dengan *overhead* data yang sangat minimal, menjadikannya salah satu protokol komunikasi yang paling banyak diadopsi dalam ekosistem *Internet of Things* (IoT) untuk transmisi data sensor secara *real-time*. Arsitektur MQTT terdiri atas tiga entitas utama yang saling berinteraksi. Entitas pertama adalah *publisher*, yaitu perangkat yang bertugas menghasilkan dan mengirimkan data ke dalam sistem. Entitas kedua adalah *broker*, yaitu peladen perantara yang menerima seluruh pesan dari *publisher*, mengelola daftar langganan (*subscription*), dan mendistribusikan pesan ke pihak yang berhak menerimanya. Entitas ketiga adalah *subscriber*, yaitu perangkat atau aplikasi yang mendaftarkan diri untuk menerima data dari topik (*topic*) tertentu melalui *broker* (Habibi *et al.* 2018). Pemisahan peran antara *publisher* dan *subscriber* ini memungkinkan komunikasi yang bersifat *loosely coupled*, di mana pengirim dan penerima data tidak perlu mengetahui keberadaan satu sama lain secara langsung, sehingga arsitektur sistem menjadi lebih fleksibel dan mudah dikembangkan. Salah satu keunggulan teknis MQTT yang sangat relevan untuk aplikasi IoT adalah mekanisme *Quality of Service* (QoS) yang dapat dikonfigurasi dalam tiga tingkatan. Tingkat QoS 0 (*at most once*) mengirimkan pesan tanpa konfirmasi penerimaan, QoS 1 (*at least once*) menjamin pesan terkirim minimal satu kali dengan konfirmasi, dan QoS 2 (*exactly once*) menjamin pesan terkirim tepat satu kali tanpa duplikasi. Fleksibilitas ini memungkinkan pengembang untuk menyeimbangkan antara keandalan pengiriman data dan efisiensi penggunaan *bandwidth* sesuai kebutuhan aplikasi (Habibi *et al.* 2018).



Gambar 3 Protokol MQTT
(Sumber: www.manubes.com)

Dalam konteks sistem pemantauan lingkungan gudang berbasis IoT, MQTT telah terbukti menjadi tulang punggung komunikasi data yang andal. Firmansyah dan Syofian (2024) mengimplementasikan MQTT sebagai protokol transmisi utama pada sistem pemantauan gudang cerdas, di mana data sensor dikirimkan dari

perangkat *edge* ke peladen pemrosesan secara berkala tanpa menyebabkan kelebihan beban jaringan. Pratama *et al.* (2021) juga menggunakan MQTT dalam sistem pemantauan berbasis ESP untuk mentransmisikan data sensor secara *real-time* ke peladen, dan membuktikan bahwa protokol ini mampu mempertahankan stabilitas koneksi meskipun perangkat beroperasi dalam kondisi jaringan yang tidak stabil. Pada penelitian ini, protokol MQTT diimplementasikan sebagai jalur komunikasi utama antara mikrokontroler ESP32-S3 sebagai *publisher* dan peladen berbasis Node.js sebagai *subscriber*, dengan *broker* MQTT EMQX yang dijalankan pada infrastruktur *cloud*. ESP32-S3 mempublikasikan paket data sensor secara asinkron setiap 1 detik ke topik MQTT yang telah ditentukan, mencakup matriks termal 32×24 piksel dari sensor MLX90640 dan nilai analog dari sensor genangan air K-0135. Selain berfungsi sebagai jalur transmisi data sensor, MQTT juga dimanfaatkan sebagai kanal komunikasi dua arah. Peladen dapat mengirimkan perintah pemicu (*trigger command*) melalui topik MQTT terpisah kepada ESP32-S3 untuk mengeksekusi pengambilan gambar menggunakan kamera OV2640 secara *real-time* apabila anomali terdeteksi (Saputra *et al.* 2022; Firmansyah dan Syofian 2024). Arsitektur komunikasi dua arah ini menjadikan MQTT bukan sekadar protokol pengiriman data, melainkan fondasi sistem kendali jarak jauh yang responsif dan efisien.

2.5 Mikrokontroler ESP32-S3

ESP32-S3 merupakan mikrokontroler *System-on-Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan ditenagai oleh prosesor Xtensa LX7 *dual-core* 32-bit dengan kecepatan *clock* hingga 240 MHz. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi 4 (IEEE 802.11 b/g/n) dan Bluetooth 5.0 *Low Energy* (BLE) yang terintegrasi secara bawaan, sehingga menjadikannya pilihan yang sangat relevan untuk aplikasi IoT yang membutuhkan transmisi data nirkabel berkecepatan tinggi. Salah satu keunggulan utama ESP32-S3 dibandingkan varian ESP32 sebelumnya adalah ketersediaan memori eksternal *Pseudo Static RAM* (PSRAM) berkapasitas hingga 8 MB, yang menyediakan ruang *buffer* memori yang memadai untuk menampung dan memproses data berukuran besar seperti *frame* gambar berformat JPEG dari modul kamera. Dalam konteks sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT, arsitektur *dual-core* ESP32-S3 memungkinkan pembagian beban komputasi (*multitasking*) secara efisien antara dua inti prosesor yang bekerja secara paralel. Firmansyah dan Indrasari (2025) mengimplementasikan mikrokontroler berbasis ESP untuk sistem pemantauan termal *real-time* yang secara simultan membaca data sensor, memproses nilai kalibrasi, dan mentransmisikan data ke peladen melalui protokol komunikasi nirkabel.

Pendekatan *multitasking* ini terbukti mampu menjaga stabilitas akuisisi data tanpa terjadinya kehilangan paket (*packet loss*) meskipun beberapa proses berjalan secara bersamaan. Keunggulan lain ESP32-S3 yang sangat krusial dalam penelitian ini adalah ketersediaan antarmuka kamera *Digital Video Port* (DVP) yang kompatibel secara langsung dengan modul kamera OV2640. Antarmuka ini memungkinkan transmisi data piksel visual melalui bus data paralel 8-bit tanpa memerlukan modul konverter tambahan, sehingga menyederhanakan desain rangkaian elektronik dan mengurangi biaya komponen. Darwis (2021) dalam penelitiannya tentang pemrosesan citra sensor MLX90640 pada mikrokontroler

menegaskan bahwa kemampuan mikrokontroler dalam mengelola antarmuka I2C secara stabil merupakan faktor penentu keakuratan data termal yang diakuisisi, karena gangguan pada jalur komunikasi I2C dapat menyebabkan distorsi pada matriks citra termal yang dihasilkan.



Gambar 4 ESP32-S3
(Sumber: docs.espressif.com)

Dari sisi antarmuka komunikasi, ESP32-S3 mendukung berbagai protokol komunikasi standar industri, antara lain I2C, SPI, UART, dan I2S, serta dilengkapi dengan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit dengan hingga 9 saluran (*channel*) yang dapat dikonfigurasi. Resolusi ADC 12-bit ini memungkinkan pembacaan variasi nilai analog dari sensor genangan air K-0135 dengan presisi tinggi, yakni mampu membedakan 4.096 tingkat nilai diskrit dalam rentang tegangan masukan. Habibi *et al.* (2018) menegaskan bahwa pemilihan mikrokontroler dengan kapabilitas ADC yang memadai merupakan faktor kritis dalam perancangan sistem IoT untuk pemantauan lingkungan, karena akurasi pembacaan sensor analog secara langsung memengaruhi keandalan keputusan yang dihasilkan oleh sistem. Aspek manajemen daya juga menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan ESP32-S3. Mikrokontroler ini dirancang dengan konsumsi daya yang efisien melalui berbagai mode tidur (*sleep mode*) yang dapat dikonfigurasi, namun tetap mampu memberikan performa komputasi tinggi saat dibutuhkan. Pratama *et al.* (2021) dalam implementasi sistem pemantauan berbasis ESP menunjukkan bahwa stabilitas catu daya yang terisolasi dari sumber tegangan bawaan mikrokontroler sangat diperlukan untuk menjaga akurasi pembacaan sensor yang sensitif terhadap riak tegangan (*voltage ripple*), terutama saat modul Wi-Fi aktif mentransmisikan data. Pertimbangan inilah yang mendasari keputusan perancangan untuk menggunakan modul penurun tegangan (*step-down*) yang terdedikasi guna menyuplai tegangan 3,3 V yang bersih dan stabil bagi sensor MLX90640 dan modul kamera OV2640 secara terpisah dari pin regulator bawaan mikrokontroler.

2.6 Notifikasi Melalui Telegram

Telegram merupakan platform pesan instan berbasis *cloud* yang bersifat *multiplatform* dan dapat diakses melalui perangkat telepon seluler maupun komputer. Salah satu fitur unggulan Telegram yang membedakannya dari platform pesan instan lainnya adalah ketersediaan antarmuka pemrograman aplikasi (API) *bot* yang terbuka dan terdokumentasi dengan baik. Melalui *Telegram Bot API*, pengembang dapat membangun agen perangkat lunak otomatis (*bot*) yang mampu

mengirimkan pesan teks, gambar, dokumen, dan berbagai jenis konten multimedia secara terprogram ke pengguna atau grup tertentu tanpa intervensi manusia. Dalam konteks sistem IoT untuk pemantauan lingkungan, integrasi *Telegram Bot API* sebagai kanal notifikasi otomatis telah terbukti efektif dan banyak diadopsi. Pratama *et al.* (2021) mengimplementasikan Telegram sebagai media penyampaian notifikasi pada sistem pemantauan ketebalan debu dan suhu ruangan berbasis IoT, di mana pesan peringatan dikirimkan secara otomatis ke akun Telegram operator apabila nilai sensor melampaui ambang batas yang telah ditetapkan. Pendekatan ini terbukti mampu memperpendek waktu respons operator secara signifikan dibandingkan metode notifikasi konvensional seperti surat elektronik (*email*), karena pesan Telegram muncul secara langsung sebagai notifikasi *push* pada perangkat *mobile* tanpa memerlukan proses *login* terlebih dahulu.



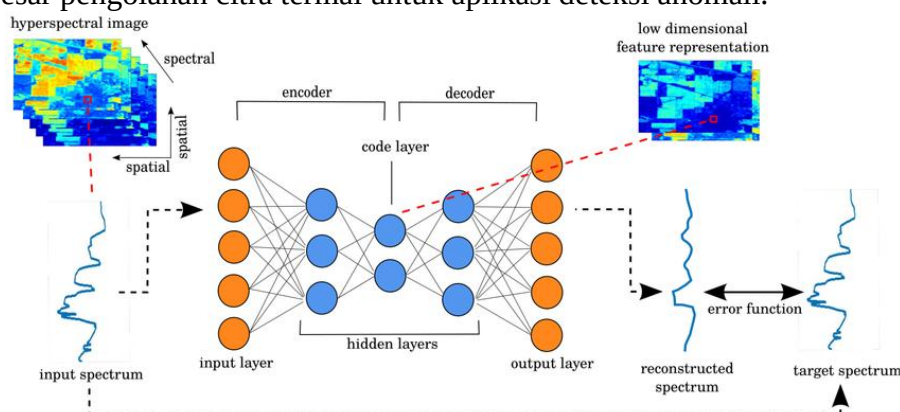
Gambar 5 Telegram
(Sumber: au.pcmag.com)

Keunggulan Telegram sebagai kanal notifikasi sistem IoT juga terletak pada kemampuannya mengirimkan lampiran berkas multimedia. Firmansyah dan Syofian (2024) dalam perancangan sistem gudang cerdas berbasis IoT menekankan pentingnya notifikasi yang tidak hanya memuat nilai numerik sensor, tetapi juga menyertakan konteks visual yang memungkinkan operator mengambil keputusan tindakan yang tepat secara *remote*. Hal ini sangat relevan dengan kebutuhan sistem pemantauan gudang aset medis, di mana operator perlu memverifikasi kondisi aktual ruangan sebelum memutuskan tindakan penanganan darurat. Selain itu, Telegram mendukung pengiriman pesan ke grup dengan jumlah anggota yang besar, sehingga satu notifikasi dapat diterima secara bersamaan oleh seluruh pemangku kepentingan yang relevan, mulai dari teknisi lapangan hingga manajer operasional (Ningsi *et al.* 2025). Kemampuan ini menjadikan Telegram sebagai solusi notifikasi yang sangat skalabel untuk lingkungan industri dengan struktur tim yang hierarkis. Pada penelitian ini, *Telegram Bot API* diintegrasikan ke dalam peladen (*Backend*) Node.js sebagai komponen penanganan darurat lapis akhir. Apabila sistem mendeteksi anomali, baik yang bersumber dari nilai kerugian rekonstruksi (*reconstruction loss*) model *Convolutional Autoencoder* yang melampaui ambang batas maupun dari klasifikasi *Decision Tree* yang mendeteksi genangan air, peladen akan secara otomatis menyusun dan mengirimkan pesan peringatan ke grup Telegram yang telah dikonfigurasi. Pesan tersebut memuat informasi rinci mengenai jenis anomali, nilai sensor terkait, serta lampiran foto kondisi terkini yang diambil oleh kamera OV2640 dan telah didekode dari format *string* Base64 menjadi berkas JPEG (Pratama *et al.* 2021; Firmansyah dan Syofian 2024). Integrasi ini memastikan bahwa setiap kejadian anomali yang terdeteksi oleh sistem dapat

segera diketahui dan ditindaklanjuti oleh operator secara *real-time*, bahkan dari jarak jauh.

2.7 Autoencoder (Unsupervised Learning)

Autoencoder merupakan arsitektur jaringan saraf tiruan (*Deep Learning*) yang dirancang untuk mempelajari representasi data secara mandiri tanpa memerlukan label kelas (*unsupervised learning*) atau dengan memanfaatkan data masukan itu sendiri sebagai target keluaran (*self-supervised learning*). Tujuan utama arsitektur ini adalah merekonstruksi data masukan (*input*) menjadi keluaran (*output*) yang seidentik mungkin dengan aslinya, dengan cara memaksa data melewati lapisan *bottleneck* berkapasitas rendah sehingga jaringan terpaksa mempelajari representasi fitur yang paling esensial dan padat (Tilak *et al.* 2020). Secara struktural, *Autoencoder* terdiri atas dua komponen utama yang bekerja secara simetris. Komponen pertama adalah *encoder*, yaitu rangkaian lapisan yang bertugas mengekstraksi dan memampatkan data masukan berdimensi tinggi menjadi representasi fitur berdimensi rendah yang disebut *latent space* atau *bottleneck representation*. Komponen kedua adalah *decoder*, yaitu rangkaian lapisan yang bekerja secara terbalik, yakni berupaya merekonstruksi kembali data asli dari representasi *latent space* tersebut. Kualitas rekonstruksi diukur menggunakan fungsi kerugian (*loss function*), di mana nilai kerugian yang rendah menandakan bahwa model berhasil mempelajari pola data dengan baik (Tilak *et al.* 2020). Varian yang lebih canggih dari arsitektur ini adalah *Convolutional Autoencoder* (CAE), yang menggantikan lapisan *fully connected* dengan lapisan konvolusi dua dimensi (*Conv2D*) pada *encoder* dan lapisan *upsampling* pada *decoder*. Penggunaan lapisan konvolusi memungkinkan model untuk mengekstraksi fitur spasial lokal secara hierarkis, seperti tepi, tekstur, dan pola distribusi panas pada citra termal, sehingga arsitektur ini jauh lebih efektif untuk memproses data berbentuk matriks citra dibandingkan *Autoencoder* konvensional (Behrouzi *et al.* 2023). Chidurala dan Li (2022) membuktikan bahwa pendekatan berbasis citra termal yang diproses menggunakan arsitektur jaringan saraf tiruan mampu mendeteksi keberadaan objek bergerak secara akurat, yang menegaskan potensi besar pengolahan citra termal untuk aplikasi deteksi anomali.



Gambar 6 Autoencoder

(Sumber: www.researchgate.net)

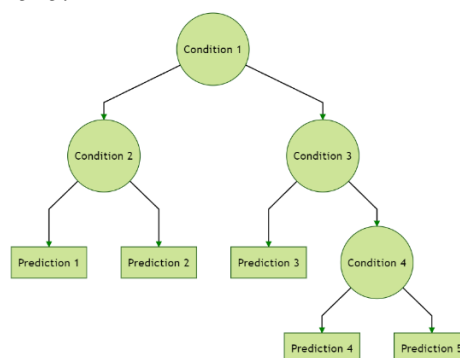
Penerapan *Convolutional Autoencoder* untuk deteksi anomali termal pada lingkungan industri didasarkan pada prinsip yang sederhana namun sangat efektif.

Model dilatih secara eksklusif menggunakan data citra termal dalam kondisi normal, sehingga model hanya mempelajari pola distribusi panas yang lazim terjadi di lingkungan tersebut (Tilak *et al.* 2020). Akibatnya, ketika model dihadapkan pada citra yang mengandung anomali, seperti *Hotspot* akibat korsleting kabel atau keberadaan penyusup yang memancarkan panas tubuh, model akan gagal merekonstruksi bagian anomali tersebut dengan akurat. Selisih antara citra asli dan citra hasil rekonstruksi model inilah yang disebut sebagai *reconstruction loss* atau nilai kerugian rekonstruksi, yang dijadikan indikator kuantitatif utama untuk memicu alarm peringatan (Behrouzi *et al.* 2023). Keunggulan pendekatan ini dibandingkan sistem berbasis ambang batas statis telah dibuktikan secara empiris oleh Behrouzi *et al.* (2023), yang mendemonstrasikan bahwa penggunaan *Autoencoder* untuk deteksi dan lokalisasi cacat visual pada citra termal industri mampu mengidentifikasi anomali lokal berskala kecil yang tidak terdeteksi oleh metode konvensional. Hal ini sejalan dengan temuan Prinanto *et al.* (2022) yang menerapkan kamera termal dan jaringan saraf tiruan untuk mendiagnosis kondisi abnormal pada sistem pemancar magnetron, di mana pendekatan berbasis rekonstruksi citra terbukti mampu mendeteksi degradasi komponen secara dini sebelum kegagalan total terjadi. Lebih jauh, Batubara *et al.* (2022) membuktikan bahwa integrasi kamera termal dengan jaringan saraf tiruan pada sistem inspeksi kabel mampu mendeteksi titik panas (*Hotspot*) secara akurat sebagai langkah pencegahan kebakaran, yang secara langsung relevan dengan konteks proteksi aset medis dalam penelitian ini. Keunggulan lain dari pendekatan *unsupervised learning* berbasis *Autoencoder* adalah tidak diperlukannya proses pelabelan data anomali secara manual, yang dalam praktiknya sangat sulit dilakukan karena kejadian anomali bersifat langka dan tidak terprediksi. Model cukup dilatih menggunakan data normal yang mudah dikumpulkan dalam jumlah besar, sehingga pendekatan ini sangat praktis untuk diterapkan pada sistem pemantauan lingkungan gudang secara nyata (Tilak *et al.* 2020; Behrouzi *et al.* 2023).

2.8 Decision Tree untuk Klasifikasi Berbasis Aturan

Decision Tree atau pohon keputusan merupakan salah satu algoritme *Machine Learning* yang paling banyak digunakan untuk tugas klasifikasi dan regresi. Algoritme ini bekerja dengan membangun struktur pohon hierarkis yang terdiri atas simpul keputusan (*decision node*), cabang (*branch*), dan simpul daun (*leaf node*). Setiap simpul keputusan merepresentasikan sebuah kondisi logis (*if-then*) terhadap suatu atribut masukan, setiap cabang merepresentasikan hasil dari kondisi tersebut, dan setiap simpul daun merepresentasikan label kelas atau keputusan akhir. Keunggulan utama algoritme ini terletak pada sifatnya yang mudah diinterpretasi oleh manusia (*human-readable*), karena alur pengambilan keputusannya dapat divisualisasikan dan dipahami secara intuitif tanpa memerlukan pemahaman matematika tingkat lanjut. Dalam konteks sistem IoT untuk pemantauan lingkungan, pendekatan berbasis aturan (*rule-based*) yang terinspirasi dari struktur *Decision Tree* terbukti efektif digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi lingkungan secara kontekstual. Saputra *et al.* (2022) mendemonstrasikan penerapan *Machine Learning* untuk mendeteksi kebocoran pipa air pada jaringan nirkabel, di mana logika klasifikasi berbasis kondisi sensor digunakan untuk membedakan jenis dan lokasi kebocoran secara otomatis. Pendekatan ini membuktikan bahwa kombinasi data sensor dengan logika

kondisional mampu menghasilkan klasifikasi yang lebih informatif dibandingkan sistem deteksi biner sederhana.



Gambar 7 Algoritma *Decision Tree*
(Sumber: machinelearningtheory.org)

Lebih jauh, efektivitas pendekatan berbasis aturan semakin meningkat ketika data sensor dikombinasikan dengan sumber data kontekstual eksternal. Yadav (2024) membuktikan bahwa integrasi data cuaca *real-time* dari OpenWeatherMap API ke dalam logika kendali sistem IoT mampu menghasilkan keputusan yang lebih adaptif dan akurat terhadap kondisi lingkungan nyata. Dalam penelitiannya tentang sistem irigasi cerdas, data prakiraan cuaca digunakan sebagai variabel masukan tambahan yang secara signifikan meningkatkan ketepatan klasifikasi kondisi lingkungan. Prinsip yang sama diterapkan oleh Ningsi *et al.* (2025) dalam sistem pemantauan gudang farmasi, di mana algoritme berbasis aturan digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi suhu dan kelembapan secara otomatis guna memicu respons pengendalian yang tepat. Pada penelitian ini, *Decision Tree* diimplementasikan dalam bentuk logika *rule-based* yang tidak memerlukan proses pelatihan (*training*) dengan data berlabel, melainkan dibangun secara eksplisit berdasarkan pengetahuan domain (*domain knowledge*).

Logika ini menggabungkan dua variabel masukan: (1) nilai analog dari sensor genangan air K-0135 yang menunjukkan status basah atau kering pada lantai gudang, dan (2) data kondisi cuaca *real-time* (hujan atau cerah) yang diperoleh dari OpenWeatherMap API berdasarkan koordinat geolokasi gudang. Kombinasi kedua variabel ini menghasilkan empat kemungkinan skenario klasifikasi yang masing-masing dipetakan ke rekomendasi tindakan yang spesifik, seperti "periksa kebocoran atap" apabila sensor mendeteksi genangan saat kondisi cuaca hujan, atau "selidiki kebocoran pipa internal" apabila genangan terdeteksi saat cuaca cerah (Saputra *et al.* 2022; Yadav *et al.* 2024). Pendekatan ini memungkinkan sistem memberikan klasifikasi kontekstual yang jauh lebih informatif dibandingkan sistem deteksi genangan biner yang hanya mampu membedakan kondisi basah dan kering tanpa memberikan informasi mengenai sumber penyebabnya (Firmansyah dan Syofian 2024).

2.9 Proteksi Aset Medis dalam Penyimpanan

Penyimpanan aset medis memerlukan pengendalian kondisi lingkungan yang ketat karena berbagai jenis aset memiliki tingkat kerentanan yang berbeda terhadap faktor fisik seperti suhu, kelembapan, dan paparan air. Peralatan elektronik presisi tinggi seperti alat pemantau detak jantung dan sensor diagnostik sangat rentan

mengalami penurunan akurasi kalibrasi apabila terpapar suhu berlebih dalam jangka waktu tertentu (Kremer *et al.* 2023). Penelitian Kremer *et al.* (2023) secara khusus membuktikan bahwa kombinasi faktor waktu, suhu, dan kelembapan secara signifikan memengaruhi kondisi fisik dan fungsional perangkat medis, sehingga pengendalian lingkungan penyimpanan bukan sekadar prosedur administratif, melainkan kebutuhan teknis yang mendasar. Di sisi lain, bahan medis habis pakai seperti linen bedah, tisu medis, kasur medis, dan masker bedah memiliki kerentanan yang berbeda, yaitu terhadap paparan kelembapan dan genangan air. Dipahayu *et al.* (2018) membuktikan bahwa paparan kelembapan berlebih secara langsung memengaruhi *shelf-life* linen bedah steril, di mana kondisi penyimpanan yang tidak terkendali dapat memperpendek masa layak pakai secara signifikan dan berpotensi melanggar standar sterilitas yang ditetapkan. Lebih jauh, kelembapan yang tidak terkontrol juga mempercepat laju korosi pada komponen logam perangkat medis (Sumanto dan Maghfiroh 2019), sehingga kerugian yang ditimbulkan tidak hanya bersifat fungsional tetapi juga finansial.

Risiko terhadap aset medis tidak hanya berasal dari faktor lingkungan, tetapi juga dari kondisi fisik ruang penyimpanan itu sendiri. Vickriyal *et al.* (2025) mengidentifikasi berbagai faktor risiko fisik di ruang penyimpanan rekam medis, termasuk ketidakstabilan suhu, paparan debu, dan potensi kebocoran, yang secara kolektif dapat menurunkan integritas aset yang disimpan. Temuan ini menegaskan bahwa pemantauan kondisi fisik ruang penyimpanan secara berkelanjutan merupakan komponen penting dalam manajemen risiko aset medis. Dalam konteks distribusi alat kesehatan, Blake *et al.* (2025) menetapkan praktik terbaik (*best practices*) penyimpanan perangkat medis yang dapat digunakan kembali, yang mencakup pengendalian suhu, kelembapan, dan kebersihan ruang penyimpanan sebagai standar minimum yang harus dipenuhi. Standar ini sejalan dengan temuan Cahyono *et al.* (2023) yang menekankan bahwa sistem manajemen pemeliharaan alat medis yang efektif harus mencakup pemantauan kondisi lingkungan secara proaktif, bukan hanya respons reaktif setelah kerusakan terjadi. Berdasarkan kajian literatur di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem pemantauan lingkungan gudang penyimpanan aset medis merupakan bagian integral dari manajemen risiko operasional. Ketiadaan sistem pemantauan yang andal berpotensi menyebabkan kerusakan aset yang tidak terdeteksi secara dini, yang pada akhirnya berdampak pada kerugian finansial, pelanggaran regulasi kesehatan, dan terganggunya rantai distribusi alat medis (Cahyono *et al.* 2023; Blake *et al.* 2025).

2.10 OpenWeatherMap API

OpenWeatherMap merupakan layanan antarmuka pemrograman aplikasi (API) berbasis *cloud* yang menyediakan data meteorologi secara *real-time* maupun prakiraan cuaca untuk lokasi geografis mana pun di seluruh dunia berdasarkan koordinat geolokasi. Layanan ini menyediakan berbagai parameter cuaca, antara lain kondisi presipitasi (hujan atau cerah), suhu udara, kelembapan relatif, dan kecepatan angin yang dapat diakses melalui permintaan HTTP sederhana dengan format respons JSON. Dalam konteks sistem IoT, integrasi data cuaca eksternal dari OpenWeatherMap API terbukti mampu meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan sistem secara kontekstual. Yadav (2024) mendemonstrasikan penerapan OpenWeatherMap API pada sistem irigasi cerdas berbasis IoT, di mana data

prakiraan cuaca digunakan sebagai masukan utama untuk menentukan jadwal penyiraman secara otomatis.



Gambar 8 OpenWeatherMap
(Sumber: www.home-assistant.io)

Pendekatan ini membuktikan bahwa data meteorologi eksternal dapat diintegrasikan secara langsung ke dalam logika kendali perangkat IoT guna menghasilkan keputusan yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan nyata. Pada penelitian ini, OpenWeatherMap API dimanfaatkan sebagai sumber data cuaca *real-time* yang diintegrasikan ke dalam logika klasifikasi *Decision Tree*. Data kondisi presipitasi yang diperoleh dari API tersebut dikombinasikan dengan pembacaan sensor genangan air K-0135 untuk menentukan asal sumber kebocoran secara kontekstual, yakni membedakan antara kebocoran atap yang dipicu hujan dan kebocoran pipa internal yang terjadi saat cuaca cerah.



III METODE

3.1 Lokasi dan Waktu Proyek

Kegiatan penelitian dilaksanakan secara bertahap pada dua lokasi utama. Tahap pertama, yang mencakup observasi lapangan, pengambilan data sensor, serta uji coba perangkat keras, dilaksanakan di Gudang PT Synergy Dua Kawan Sejati, Cikupa, Kabupaten Tangerang, pada bulan Agustus 2025 hingga Desember 2025. Tahap kedua, yang meliputi pengembangan perangkat lunak, pelatihan model kecerdasan buatan, validasi sistem, serta penyusunan laporan akhir, dilaksanakan di Perumahan Grand Riscon Padjajaran, Kabupaten Bogor, pada bulan Januari 2026 hingga April 2026.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Perangkat Keras

Sistem proteksi aset medis ini dirancang sebagai satu kesatuan perangkat IoT berbasis *tripod* yang terintegrasi. Pemilihan setiap komponen dilakukan berdasarkan pertimbangan teknis, keandalan, dan kesesuaian dengan lingkungan gudang tropis yang lembap dan berdebu. Komponen utama meliputi tabel berikut:

Tabel 1 Daftar Perangkat Keras

Komponen	Fungsi
ESP32-S3	Unit kendali utama yang membaca data sensor, mengelola koneksi WiFi, dan mengirim data via MQTT.
MLX90640	32×24 <i>Thermal Array</i> , mengukur distribusi suhu permukaan objek dalam bentuk <i>array</i> 768 nilai Celsius.
K-0135	<i>Analog Water Level Sensor</i> , mendeteksi keberadaan genangan air berdasarkan konduktivitas listrik antar elektroda.
OV2640	Mengambil gambar visual sebagai bukti verifikasi saat anomali termal terdeteksi.
MP1584 3.3V	Menstabilkan tegangan dari sumber daya 5V DC menjadi 3.3V DC untuk komponen elektronik.
UPS 5V 6000mAh	Memberikan daya cadangan selama pemadaman listrik untuk memastikan tidak ada kehilangan data.
Sakelar 2 Pin ON/OFF	Menghubungkan dan Memutuskan Aliran Arus Listrik dari UPS.
Tripod Aluminium	Menopang seluruh <i>casing</i> dan komponen elektronik, dengan kemampuan penyesuaian ketinggian dan sudut pandang.
Casing 3D PLA	Melindungi komponen elektronik dari debu, kelembapan, dan benturan fisik.

PCB Berlubang 1 Layer	Digunakan untuk integrasi rangkaian secara Terorganisir.
Adaptor 5V type C	Mengubah tegangan dari sumber listrik AC 220V menjadi tegangan 5V DC yang stabil.
Modem USB 4G LTE	Berfungsi sebagai antarmuka konektivitas jaringan seluler, memungkinkan perangkat IoT terhubung ke internet untuk mengirim dan menerima data melalui protokol MQTT.
Kabel Tembaga Tunggal 0,5mm	Sebagai jalur penghantar arus listrik untuk menghubungkan antar komponen elektronik.
Timah Solder	Digunakan untuk menyambungkan kabel dengan kaki komponen, memastikan aliran arus listrik yang baik.

3.2.2 Perangkat Lunak

Pemilihan perangkat lunak mempertimbangkan kemudahan integrasi dengan komponen fisik, dukungan terhadap protokol *IoT* seperti MQTT. sistem ini mengintegrasikan berbagai perangkat lunak sesuai lapisan fungsionalnya:

Tabel 2 Daftar Kebutuhan Perangkat Lunak

Perangkat Lunak	Fungsi
Visual studio code	Pengembangan <i>firmware</i> ESP32-S3 dan <i>website</i> .
Node.js dan Express.js	Kerangka kerja <i>Backend</i> server yang menerima data MQTT, mengelola logika <i>threshold</i> , dan mengirim notifikasi.
Next.js	Kerangka kerja untuk visualisasi data <i>real-time</i> , pengaturan <i>threshold</i> , dan tampilan <i>dashboard</i> .
Supabase (PostgreSQL)	<i>Database cloud</i> untuk menyimpan data sensor dan log sistem.
EMQX	<i>Broker</i> MQTT yang menghubungkan ESP32-S3 dengan <i>Backend</i> server.
OpenWeatherMap API	Sumber data cuaca <i>real-time</i> untuk <i>Decision Tree</i> .
Telegram Bot API	Integrasi notifikasi otomatis ke grup Telegram saat insiden terdeteksi.
Fusion 360	Perangkat lunak desain 3D untuk membuat model <i>casing</i> dan <i>tripod</i> .
Github	Sistem kontrol versi dan repositori kode sumber.
Digital Ocean	Layanan <i>cloud server</i> untuk menjalankan <i>Backend</i> Node.js secara permanen.
Vercel	Platform <i>hosting</i> untuk <i>frontend</i> Next.js.
Name.com	Pendaftaran dan pembelian nama domain



3.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan campuran (*mixed-method*) yang mencakup empat tahap berikut:

- Studi Literatur: Dilakukan untuk mengumpulkan landasan teori terkait spesifikasi sensor MLX90640 dan K-0135, protokol MQTT, arsitektur *Convolutional Autoencoder*, algoritme *Decision Tree*, serta studi kasus penerapan sistem IoT pada *monitoring* lingkungan industri.
- Observasi dan Wawancara Kualitatif: Dilakukan secara langsung dengan penanggung jawab gudang PT Synergy Dua Kawan Sejati guna mengidentifikasi titik risiko kebocoran atap, pola fluktuasi suhu harian, tata letak penyimpanan, serta insiden historis yang pernah terjadi di gudang.
- Pengumpulan Data Eksperimental (Kuantitatif): Untuk merepresentasikan topologi gudang aset medis secara valid, dibangun *mock-up* berupa tiga tumpukan kardus berdimensi 35×26,5×96 cm yang disusun menyerupai kondisi penyimpanan aset medis di gudang. *Tripod* sensor diposisikan secara geometris pada ketinggian 154 cm dengan kemiringan sudut elevasi 43° menghadap ke bawah, rangka *tripod* berjarak 66 cm dari tumpukan kardus. Konfigurasi sudut pandang ini dirancang agar *Field of View* (FOV) sensor sebesar 55°×35° dapat mencakup tiga bidang pandang sekaligus, yaitu sisi atas, kiri, dan kanan objek simulasi. Proses pengambilan data dilakukan secara kontinu selama 4 hari 6 jam 53 menit 14 detik dalam kondisi lingkungan normal tanpa insiden, dengan laju pengambilan data satu *frame* per 10 detik. Melalui proses akuisisi ini, terkumpul sebanyak 34.560 *frame* data mentah setelah proses *cleaning*, diperoleh 24.179 sampel data matriks suhu 32×24 piksel yang merangkum dinamika termal pada waktu siang dan malam hari.
- Validasi: Seluruh komponen divalidasi melalui pengujian di lingkungan tiruan (TKT Level 6) yang mereplikasi kondisi gudang nyata untuk mengukur akurasi model AI, tingkat reduksi alarm palsu, dan waktu respons notifikasi.

3.4 Analisis Data

3.4.1 Pra-Pemrosesan Data Termal Berbasis Normalisasi Spasial

Sebelum matriks citra termal dimasukkan ke dalam model, data mentah direkayasa untuk memastikan model kebal terhadap fluktuasi suhu ruangan alami antara siang dan malam. Teknik *Zero-Mean Normalization* diterapkan beserta pemfilteran batas (*anti-noise clipping*) dengan formulasi:

$$T_{norm} = \text{clip} \left(\frac{(T_{piksel} - T_{mean}) - rel_{min}}{rel_{max} - rel_{min}}, 0, 1 \right)$$

Keterangan:

T_{norm} : Nilai suhu ternormalisasi dalam rentang [0, 1].

T_{piksel} : Nilai suhu absolut pada satu piksel citra termal (°C).

T_{mean} : Suhu rata-rata (mean) dari seluruh 768 piksel dalam satu *frame*.

rel_{min} : Batas bawah distribusi data relatif (persentil 0,1%), bernilai -1,38.

rel_{max} : Batas atas distribusi data relatif (persentil 99,9%), bernilai 2,61.

Pengurangan nilai piksel absolut dengan rata-rata *frame* ($T_{piksel} - T_{mean}$) bertujuan untuk mentransformasi suhu absolut menjadi suhu relatif. Sebagai contoh, objek bersuhu 35°C pada siang hari (rata-rata ruang 34°C) memiliki selisih relatif +1°C, sama persis dengan objek bersuhu 28°C pada malam hari (rata-rata ruang 27°C). Dengan logika ini, model AI dipaksa untuk memprioritaskan pencarian pola lonjakan panas (*Hotspot* spasial), alih-alih diakali oleh suhu cuaca alami. Pembagian dengan selisih persentil $rel_{min} - rel_{max}$ berfungsi untuk mereduksi *noise* pembacaan sensor dan menekan seluruh nilai ke skala desimal 0 hingga 1 (*Min-Max Scaling*) guna mencegah terjadinya komputasi gradien yang meledak selama proses pelatihan model.

3.4.2 Pemodelan *Convolutional Autoencoder* dan *Threshold 3-Sigma*

Data ternormalisasi dilatih pada *Backend* (Python) menggunakan pustaka Keras/TensorFlow. Arsitektur *Encoder* terdiri atas konvolusi 2D dengan 16 filter, dan *Decoder* menggunakan *UpSampling2D*. Pelatihan (*Training*) dilakukan selama 50 *Epochs* dibagi menjadi data latih (80%) dan data uji (20%) menggunakan metode *train-test split* acak (*random split*), menghasilkan 19.343 *frame* data latih dan 4.836 *frame* data uji. Proporsi 80:20 ini bukan dipilih secara sembarang, melainkan merupakan rasio yang paling umum dan tervalidasi secara luas dalam praktik *machine learning*, khususnya pada penelitian *deep autoencoder* untuk deteksi anomali berbasis *Internet of Things* yang karakteristiknya serupa dengan penelitian ini. Rhachi *et al.* (2025) dalam penerapan *deep autoencoder* untuk deteksi anomali jaringan IoT juga menggunakan proporsi 80:20 untuk memisahkan data latih dan data uji, dengan hasil akurasi deteksi yang tinggi pada klasifikasi biner maupun multi-kelas. Pemilihan proporsi ini konsisten dengan prinsip umum bahwa mayoritas data perlu dialokasikan untuk pembelajaran pola representatif model, sementara sebagian data tetap disisihkan dalam jumlah yang memadai untuk menghasilkan evaluasi performa yang objektif dan tidak bias terhadap data yang telah dipelajari model. Kedua nilai metrik kesalahan tebakan dievaluasi secara simultan pada setiap *frame*, yaitu Kesalahan Global (*MSE Loss*) dan Kesalahan Lokal (*Pixel Loss*). Kedua perhitungan ini bersumber pada selisih kuadrat tunggal $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ di mana Y_i adalah suhu asli sensor dan $\hat{Y}_i$ adalah tebakan model. Sifat pengkuadratan ini secara eksponensial memberikan "penalti" pada tebakan yang meleset jauh (anomali) namun meredam *noise* kecil, menjadikannya metrik ideal untuk alarm keamanan.

1) Arsitektur Model

Model yang dibangun adalah *Convolutional Autoencoder* 2D yang terdiri dari tiga komponen utama. *Encoder* mengompresi informasi spasial melalui dua lapisan konvolusi (*Conv2D*) dengan filter berukuran 16 dan 8, masing-masing diikuti oleh lapisan *pooling* (*MaxPooling2D*) untuk mereduksi dimensi. *Bottleneck* merupakan lapisan kompresi terdalam berupa konvolusi dengan 8 filter yang memaksa model merepresentasikan seluruh informasi citra termal dalam bentuk yang paling ringkas. *Decoder* melakukan rekonstruksi spasial kembali ke dimensi semula menggunakan dua lapisan *UpSampling2D* yang diikuti oleh lapisan *Conv2D* dengan filter 16 dan 1. Seluruh arsitektur memiliki total 3.217 parameter terlatih.

2) Proses Pelatihan dan Algoritme Optimasi Adam

Proses pelatihan dilaksanakan dengan paradigma *unsupervised learning* di mana input dan target adalah data yang sama (*Input = Target*). Model dilatih untuk belajar merekonstruksi ulang citra termal kondisi normal seakurat mungkin sehingga kelak saat dihadapkan pada citra anomali yang belum pernah dilihat, model akan gagal merekonstruksinya dan menghasilkan nilai *error* yang tinggi. Adam merupakan algoritme optimasi berbasis gradien stokastik yang dikembangkan oleh Kingma dan Ba (2015). Adam menggabungkan keunggulan dua metode optimasi sebelumnya secara simultan: AdaGrad yang mampu menyesuaikan laju pembelajaran secara adaptif untuk parameter yang jarang diperbarui, dan RMSProp yang menggunakan rata-rata bergerak eksponensial dari kuadrat gradien. Adam secara otomatis menyesuaikan laju pembelajaran yang berbeda untuk setiap parameter secara individual, menghasilkan konvergensi yang lebih stabil dan cepat dibandingkan *Stochastic Gradient Descent* (SGD) konvensional. Karakteristik adaptif inilah yang menjadikan Adam pilihan utama untuk pelatihan jaringan saraf tiruan konvolusional pada data citra dengan variasi intensitas spasial tinggi seperti citra termal inframerah (Kingma dan Ba 2015).

3) Evaluasi Anomali Global (Mean Squared Error / MSE)

Fungsi MSE menjumlahkan seluruh selisih kuadrat dari 768 piksel, lalu dibagi rata. Fungsi ini digunakan untuk melacak jika ada kerusakan luas atau pemanasan serentak pada ruangan.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

4) Evaluasi Anomali Lokal (*Pixel Loss*)

Fungsi Pixel Loss bertindak sebagai pencari titik ekstrem (seperti api berukuran kecil). Fungsi ini tidak merata-ratakan nilai, melainkan mencari satu nilai selisih tebakan yang paling meleset (Maksimum) dari ke-768 piksel.

$$PixelLoss = \max_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Keterangan:

n : Jumlah total piksel dalam satu *frame* citra termal ($32 \times 24 = 768$ piksel).

Y_i : Nilai suhu asli pada piksel ke- i (input dari sensor).

$\hat{Y}_i$: Nilai suhu hasil rekonstruksi pada piksel ke- i (output dari prediksi *Autoencoder*).

Pada tahap operasional, kemunculan objek asing (seperti api atau manusia) menyebabkan model gagal merekonstruksi pola spasial tersebut secara akurat, sehingga memicu lonjakan nilai *reconstruction loss* baik MSE Loss maupun Pixel Loss hingga melampaui ambang batas yang telah ditetapkan, dan secara otonom diklasifikasikan sebagai anomali termal (Tilak *et al.* 2020). Penetapan ambang batas ini didasarkan pada kaidah empiris statistik yang dikenal sebagai *Three-Sigma Rule*. Berdasarkan teori distribusi probabilitas normal (*Gaussian*), sekitar 99,7% data yang berasal dari kondisi normal berada dalam rentang $\mu \pm 3\sigma$. Dengan demikian, ambang batas ditetapkan pada nilai $\mu + 3\sigma$, sehingga probabilitas nilai *loss* dari kondisi normal secara wajar melampaui batas tersebut adalah kurang dari 0,3%. Probabilitas yang sangat kecil inilah yang menjadi

justifikasi statistik untuk mengklasifikasikan kejadian yang melampaui ambang batas tersebut sebagai "Anomali Termal Kritis". Pendekatan berbasis distribusi data ini terbukti secara empiris mampu menekan tingkat *false alarm* dan meningkatkan sensitivitas deteksi anomali lokal berskala kecil dibandingkan penggunaan ambang batas absolut (statis) yang digunakan sistem sebelumnya (Behrouzi *et al.* 2023).

$$\tau_{\text{global}} = \mu_{\text{MSE}} + 3\sigma_{\text{MSE}}, \quad \tau_{\text{lokal}} = \mu_{\text{Pixel}} + 3\sigma_{\text{Pixel}}$$

Keterangan:

τ_{global} : Ambang batas (*threshold*) anomali global untuk satu frame utuh (MSE Loss) = 0,006.

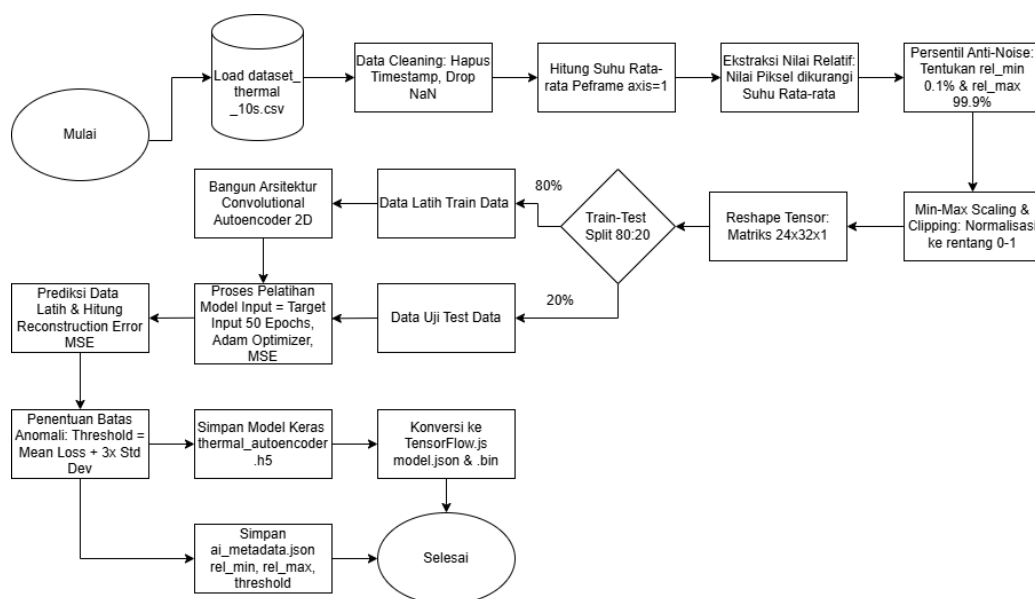
μ_{MSE} : Rata-rata nilai MSE dari seluruh data latih kondisi normal.

$3\sigma_{\text{MSE}}$: Standar deviasi dari nilai MSE pada data latih.

τ_{lokal} : Ambang batas (*threshold*) anomali lokal untuk titik piksel spesifik (Pixel Loss) = 0,165.

μ_{Pixel} : Rata-rata tingkat kesalahan rekonstruksi per piksel pada data latih.

$3\sigma_{\text{Pixel}}$: Standar deviasi tingkat kesalahan rekonstruksi per piksel.



Gambar 9 Diagram Alir Tahap Pelatihan Model *Autoencoder*

Contoh Simulasi Perhitungan Matematis 1 Frame Untuk membuktikan secara matematis mengapa *Pixel Loss* sangat krusial dan MSE saja tidak cukup, berikut adalah contoh perhitungan fiktif empiris 1 frame (terdiri dari 768 piksel) yang merepresentasikan kejadian adanya "Satu kabel korslet/api berukuran sebesar korek api di Piksel ke-100" pada tabel 3 berikut:

Tabel 3 Simulasi Perhitungan *Loss 1 Frame* (768 Piksel)

Urutan Piksel	Suhu Asli Normalisasi (Y_i)	Prediksi ($\hat{Y}_i$)	Selisih ($Y_i - \hat{Y}_i$)	Selisih Kuadrat ($Y_i - \hat{Y}_i$) ²	Keterangan
------------------	--	-----------------------------	----------------------------------	--	------------

Piksel ke 1	0,35	0,34	0,01	0,0001	Aman
Piksel ke 2	0,36	0,36	0,00	0,0000	Aman
Piksel ke 100	0,90	0,35	0,55	0,3025	Anomali
Piksel ke 768	0,35	0,34	0,01	0,0001	Aman
764 Piksel Lainnya	-	-	-	-	Rata-Rata Aman

Dari tabel di atas, sistem akan mengolah hasil kuadrat tersebut menjadi alarm Kalkulasi MSE (Rata-rata) sistem menjumlahkan semua nilai kuadrat ((767 piksel aman $\times$ 0,0001) + 0,3025) lalu dibagi 768. Hasil akhirnya MSE = 0,00049. Karena $0,00049 < 0,006$ (*Threshold*), MSE menganggap gudang AMAN (Gagal Deteksi). Kalkulasi *Pixel Loss* (Maksimum): Sistem memindai 768 nilai kuadrat dan mengambil angka terbesar, yaitu 0,3025. Karena $0,3025 > 0,165$ (*Threshold*), *Pixel Loss* langsung memicu ALARM BAHAYA (Berhasil Deteksi). Simulasi perhitungan ini membuktikan bahwa tanpa *Pixel Loss*, anomali kecil akan "tenggelam" akibat pembagian rata-rata oleh ratusan piksel yang bersuhu normal dan alarm palsu sering terjadi dikarenakan perubahan rata-rata suhu pada siang hari.

3.5 Prosedur Kerja

Prosedur kerja dalam penelitian ini dirancang sebagai panduan langkah demi langkah yang sistematis untuk memastikan seluruh sasaran penelitian tercapai. Prosedur ini terbagi ke dalam tiga tahapan utama pelaksanaan, yakni tahap prapengembangan, tahap pengembangan, serta tahap pengujian dan validasi.

- Tahap Prapengembangan Tahap ini diawali dengan identifikasi masalah melalui observasi lapangan secara langsung dan wawancara dengan penanggung jawab gudang di PT Synergy Dua Kawan Sejati. Tujuannya adalah memetakan kerentanan fasilitas terhadap fluktuasi suhu dan risiko kebocoran, serta spesifikasi aset medis yang dilindungi. Langkah selanjutnya adalah studi literatur yang mengkaji penelitian terdahulu terkait kelemahan sistem pemantauan berbasis ambang batas statis serta potensi penerapan jaringan saraf tiruan (*Convolutional Autoencoder*) dan algoritme klasifikasi (*Decision Tree*) pada arsitektur *Internet of Things (IoT)*. Setelah rumusan masalah ditetapkan, dilakukan perancangan arsitektur sistem secara holistik mulai dari lapis perangkat keras (*edge device*) hingga lapis peladen (*cloud server*). Proses prapengembangan diakhiri dengan pemilihan spesifikasi komponen, seperti penggunaan mikrokontroler ESP32-S3 yang memiliki PSRAM memadai untuk pemrosesan citra kamera OV2640, modul sensor termal MLX90640, serta

perancangan skematik rangkaian kelistrikan elektronik untuk menghindari masalah jatuh tegangan (*voltage drop*)

- b) Tahap Pengembangan: Tahap ini merupakan fase eksekusi rekayasa perangkat yang dibagi menjadi beberapa domain pekerjaan saling terkait:
- 1) Perakitan Perangkat Keras dan Manufaktur *Casing*: Mencakup proses penyolderan komponen mikrokontroler dan sensor ke papan sirkuit cetak (PCB) agar sambungan kabel tertata dengan aman. Untuk melindungi perangkat keras dari kondisi lingkungan gudang yang berdebu dan membatasi paparan kelembapan, dilakukan perancangan purwarupa berbantuan komputer (CAD) yang kemudian dicetak menggunakan pencetak tiga dimensi (3D) membentuk *casing* pelindung.
 - 2) Pemrograman *Firmware* (ESP32-S3): Pengembangan perangkat lunak tertanam menggunakan bahasa C/C++ pada perangkat lunak Arduino IDE. Fokus utama pada bagian ini adalah membangun jalur transmisi data nirkabel melalui protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) yang stabil. Upaya stabilitas ini dicapai dengan mengimplementasikan modul pengaman perangkat lunak otomatis (*Watchdog Timer*) serta membangun mekanisme Auto-Recovery untuk memulihkan jalur antarmuka komunikasi I2C secara mandiri apabila pembacaan data termal terputus.
 - 3) Pengembangan Kecerdasan Buatan dan *Backend*: Meliputi pengumpulan data suhu rekam jejak (baseline) dari lapangan dan proses penyaringan data mentah (data cleaning). Data murni hasil penyaringan kemudian digunakan untuk melatih arsitektur model Convolutional *Autoencoder* di lingkungan Jupyter Notebook (Python). Model latih selanjutnya dikonversi ke dalam lingkungan eksekusi TensorFlow.js pada server terpusat berbasis Node.js. Pada tahap ini pula, logika kondisional *Decision Tree* ditanamkan ke dalam peladen untuk menggabungkan data batas bawah sensor air analog dengan umpan data geolokasi dari antarmuka pemrograman aplikasi (API) cuaca OpenWeather.
 - 4) Pengembangan *Frontend* dan Dasbor Web: Merancang serta membangun antarmuka pengguna interaktif menggunakan pustaka React.js. Antarmuka ini dihubungkan secara terus-menerus ke server *Backend* melalui protokol Socket.io guna menampilkan pembaruan grafik fluktuasi deret waktu, sebaran citra termal matriks 32x24 secara presisi, serta panel status yang menampilkan identifikasi anomali suhu maupun klasifikasi kebocoran genangan air secara proaktif dan *real-time*.
- c) Tahap Pengujian dan Validasi: Tahap akhir penelitian ditekankan pada pengujian integritas seluruh elemen sistem secara utuh. Pengujian fungsional dilakukan untuk memverifikasi kemampuan perangkat keras melakukan pengumpulan data dengan interval konstan. Validasi kinerja model kecerdasan buatan (*Autoencoder*) dieksekusi melalui berbagai skenario simulasi anomali, seperti pemanasan paksa area lokal menggunakan sumber panas terpusat, untuk memastikan bahwa nilai kerugian rekonstruksi (*reconstruction loss*) mampu mengenali indikasi *Hotspot* (titik panas) tanpa memicu peringatan palsu pada saat terjadi fluktuasi suhu alami gudang di siang hari. Algoritme *Decision Tree* dievaluasi kemampuannya dalam menginterpretasi kondisi pembacaan basah pada sensor yang dikombinasikan dengan dua parameter cuaca berbeda (hujan atau cerah) untuk menentukan asal rembesan. Terakhir, dilakukan evaluasi

perbandingan empiris terhadap kinerja sistem pemantauan statis terdahulu untuk membuktikan peningkatan rasio akurasi alarm sistem yang baru dirancang.

3.5.1 Perancangan Logika Klasifikasi *Decision Tree* Genangan Air

Perancangan logika klasifikasi sumber genangan air menggunakan algoritma *Decision Tree* didasarkan pada kombinasi dua variabel input utama, yaitu nilai pembacaan sensor genangan air K-0135 dan data kondisi cuaca *real-time* yang diperoleh dari API OpenWeatherMap. Algoritma *Decision Tree* dipilih karena mampu menghasilkan aturan keputusan yang transparan dan dapat diinterpretasikan secara langsung. Pendekatan kontekstual ini mengatasi keterbatasan sistem sebelumnya yang hanya mampu mendeteksi keberadaan air secara biner tanpa mampu mendiagnosis sumber penyebabnya.

1) Sensor Genangan Air K-0135

Variabel pertama adalah nilai ADC (Analog-to-Digital Converter) sensor air K-0135 yang dibaca melalui pin analog mikrokontroler ESP32-S3 dengan resolusi 12-bit, menghasilkan rentang nilai integer antara 0 hingga 4095. Nilai ADC yang semakin tinggi mengindikasikan semakin banyak kontak antara permukaan konduktif sensor dengan air. Berdasarkan hasil kalibrasi empiris pada tahap pengujian awal, nilai ambang batas (*threshold*) genangan ditetapkan pada angka 550, di mana nilai ADC yang melebihi angka tersebut secara konsisten mengindikasikan adanya genangan air yang signifikan di area sensor. Nilai mentah sensor ini dikirimkan oleh ESP32-S3 melalui protokol MQTT menuju *Backend* server dan disimpan dalam variabel *latestWaterRaw* sebelum memasuki proses klasifikasi.

2) Data Cuaca *Real-time* OpenWeatherMap

Variabel kedua adalah data kondisi cuaca *real-time* yang diperoleh secara asinkronus dari API OpenWeatherMap menggunakan metode HTTP GET. Permintaan data dikirimkan menggunakan parameter koordinat geografis dengan nilai lintang LAT = -6.496899 dan bujur LON = 106.779999. Respons JSON dari API diekstraksi pada atribut deskripsi kondisi cuaca (*weather description*), yang kemudian dievaluasi menggunakan pencocokan teks (*string matching*) untuk menentukan apakah sedang terjadi presipitasi aktif. Sistem melakukan pencocokan terhadap kata kunci seperti '*rain*', '*drizzle*', '*thunderstorm*', dan padanan Bahasa Indonesia 'hujan' untuk mengidentifikasi kondisi hujan secara fleksibel terhadap berbagai format respons API.

Tabel 4 Logika Klasifikasi Sumber Kebocoran Air

Nilai Analog Sensor	Kondisi Cuaca	Penyebab Kebocoran
≤ 550 (Kering)	Tidak Hujan	Normal
> 550 (Terdeteksi)	Hujan	Kebocoran Atap
> 550 (Terdeteksi)	Tidak Hujan	Kebocoran Pipa Internal

3) Alur Pengambilan Keputusan

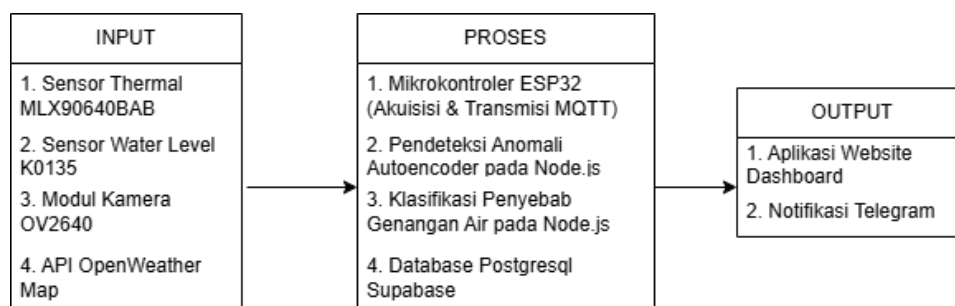
Alur pengambilan keputusan sistem dimulai dari evaluasi nilai ADC sensor air K-0135 sebagai akar pohon keputusan (*root node*). Apabila nilai ADC berada pada atau di bawah ambang batas 550, sistem menganggap kondisi area penyimpanan dalam keadaan normal dan tidak mengambil tindakan lebih lanjut. Sebaliknya, apabila nilai ADC melebihi ambang batas tersebut, sistem secara otomatis meminta data cuaca terkini dari OpenWeatherMap API

menggunakan koordinat lokasi gudang yang telah dikonfigurasi. Jika respons API mengandung kata kunci presipitasi, sistem mengklasifikasikan sumber genangan sebagai kebocoran atap yang disebabkan oleh air hujan yang merembes melalui celah atau kerusakan pada struktur atap bangunan gudang. Sebaliknya, apabila kondisi cuaca saat itu dalam keadaan cerah atau berawan tanpa hujan, sistem mengklasifikasikan genangan sebagai kebocoran pipa internal dengan status prioritas tinggi, karena sumber air berasal dari dalam bangunan dan berpotensi mengalir secara kontinu tanpa bergantung pada faktor cuaca eksternal.

3.6 Perancangan Sistem

3.6.1 Perancangan Perangkat Keras

Proses desain sistem diawali dengan penyusunan arsitektur diagram blok untuk memetakan alur komunikasi data secara menyeluruh (*end-to-end*). Secara struktural, diagram ini terbagi menjadi tiga bagian utama: *Input*, *Proses*, dan *Output*. Sistem bekerja dengan mengakuisisi data lingkungan mentah menggunakan tiga sensor khusus. Sensor MLX90640 bertugas memetakan citra suhu ruangan tak sentuh (*contactless*) dalam bentuk matriks termal beresolusi 32×24 piksel. Sensor K-0135 melakukan pembacaan nilai analog secara resistif untuk menentukan tingkat genangan cairan di lantai, sedangkan modul kamera OV2640 bertindak sebagai perangkat pemvalidasi visual yang menangkap gambar nyata (*snapshot*) dari lingkungan apabila terjadi kondisi darurat, dan seluruhnya dilengkapi data cuaca *real-time* dari OpenWeatherMap API. Arsitektur diagram blok sistem secara keseluruhan ditampilkan pada Gambar 10 berikut.



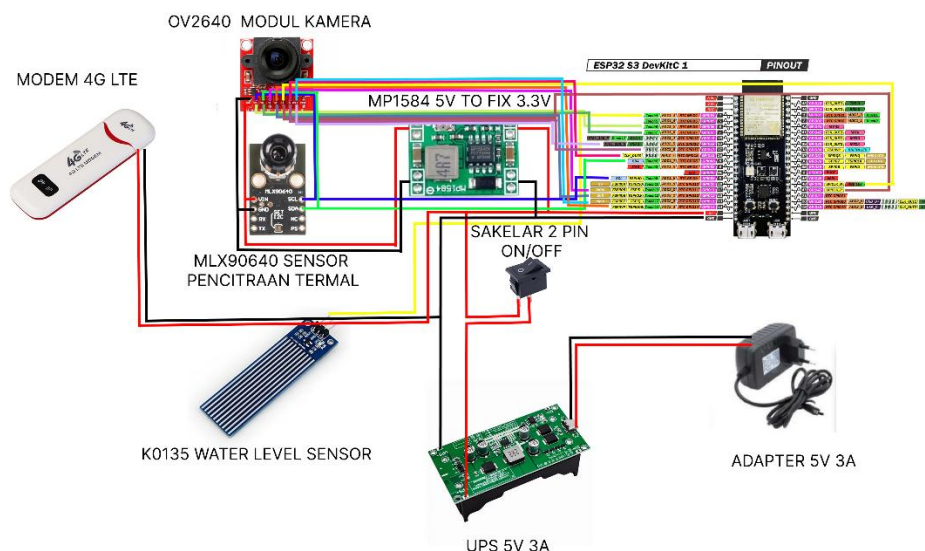
Gambar 10 Blok Diagram Sistem

Gambar 10 memperlihatkan alur data sistem yang mengalir secara searah dari bagian *Input* menuju bagian *Output* melalui tahap *Proses* di tengahnya. Bagian *Input* terdiri dari sensor MLX90640, K-0135, OV2640, dan data cuaca dari OpenWeatherMap API sebagai masukan sistem. Bagian *Proses* mencakup akuisisi dan transmisi data melalui protokol MQTT pada mikrokontroler ESP32-S3, inferensi model *Convolutional Autoencoder* untuk pendeteksian anomali termal pada *Backend* server Node.js, klasifikasi sumber kebocoran air menggunakan logika *Decision Tree* pada Node.js, serta penyimpanan seluruh data historis secara permanen ke basis data Supabase PostgreSQL melalui ORM Prisma. Bagian *Output* sebagai keluaran sistem terdiri dari aplikasi *website dashboard* dan notifikasi *Telegram Bot*. Seluruh antarmuka sensor berpusat dan

diproses oleh *edge node* berupa mikrokontroler ESP32-S3. Pemilihan mikrokontroler ini didasari oleh ketersediaan kapasitas memori eksternal (PSRAM) yang mutlak diperlukan untuk menampung *buffer* pemrosesan gambar kamera berformat JPEG sebelum mentransmisikan paket data tersebut secara *real-time* menuju *cloud server* melalui protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).

1) Skematik Rangkaian

Skematik rangkaian elektronik sistem ditampilkan pada Gambar 11 berikut.



Gambar 11 Skematik Rangkaian Elektronik

Gambar 11 menampilkan koneksi fisik antara mikrokontroler ESP32-S3 dengan seluruh komponen sensor, modul daya, dan periferal pendukung. Untuk memudahkan pembacaan, konfigurasi distribusi daya dan pemetaan pin sinyal dirangkum secara terpisah pada tabel berikut. Seluruh komponen sistem menerima daya dari adaptor 5V Tipe C melalui modul UPS sebagai sumber daya cadangan, yang kemudian disalurkan melalui sakelar 2 pin ON/OFF sebagai kontrol pemutus daya manual saat *maintenance*. Konfigurasi distribusi daya dirangkum pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Distribusi Konfigurasi Daya Sistem

No	Sumber Daya	Komponen Yang Terhubung	Tegangan	Keterangan
1	Adaptor 5V Tipe C	UPS 5V 6000mAh	5V DC	Daya Cadangan Sistem
2	UPS 5V 6000mAh	SAKELAR 2 PIN ON/OFF	5V DC	Menghubungkan dan Memutuskan Aliran Arus Listrik dari UPS

2	SAKELAR 2 PIN ON/OFF	ESP32-S3 (VCC + GND)	5V DC	Daya Utama Mikrokontroler
3	SAKELAR 2 PIN ON/OFF	SENSOR K0135 (VCC + GND)	5V DC	Daya Sensor Level Air
4	SAKELAR 2 PIN ON/OFF	MODEM USB 4G (VCC + GND)	5V DC	Daya Konektivitas Seluler
5	SAKELAR 2 PIN ON/OFF	Stepdown MP1584 (VCC + GND)	5V DC	Penurun Tegangan 5V Menjadi 3.3V
6	Stepdown MP1584 3.3V	MLX90640 (VCC + GND)	3.3V DC	Daya Sensor Termal
7	Stepdown MP1584 3.3V	0V2640 (VCC + GND)	3.3V DC	Daya Kamera

Seluruh koneksi pin sinyal antara ESP32-S3 dengan komponen sensor dan periferal dirangkum pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6 Konfigurasi Koneksi Pin Sinyal ESP32-S3

No	Komponen Terhubung	Pin Komponen	Pin ESP32- S3	Protokol	Fungsi
1	Sensor K- 0135	AOUT	GPIO 4	ADC 12- bit	Pembacaan Nilai Analog Konduktivitas Air
2	MLX90640	SDA	GPIO 8	I2C Data	Jalur Data Serial I2C
3	MLX90640	SCL	GPIO 9	I2C Clock	Jalur Pewaktu Serial I2C



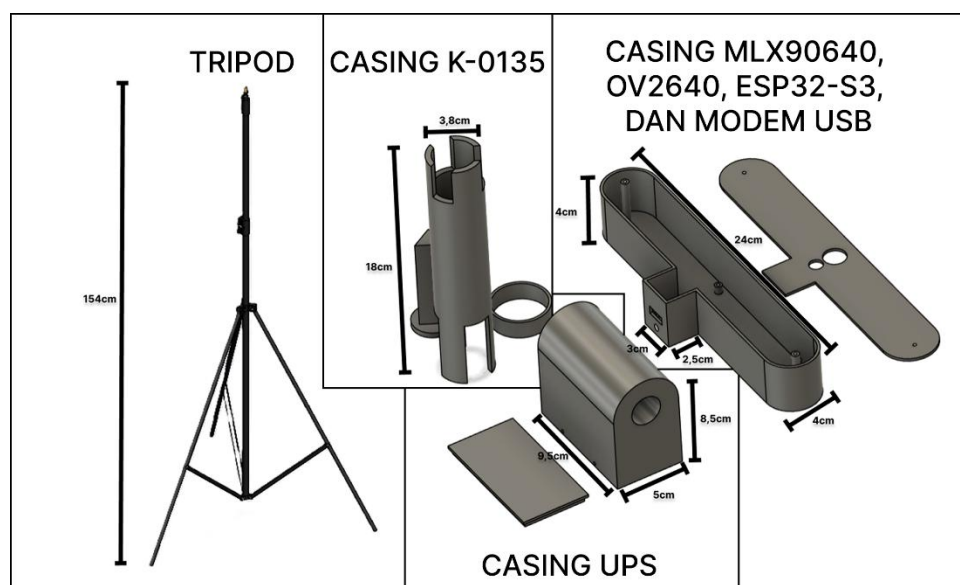
4	OV2640	SDA (SCCB)	GPIO 8	I2C/SCCB	Berbagi Jalur I2C Dengan MLX90640
5	OV2640	SCL (SCCB)	GPIO 9	I2C/SCCB	Berbagi Jalur I2C Dengan MLX90640
6	OV2640	Y2 (D0)	GPIO 11	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-0
7	OV2640	Y3 (D1)	GPIO 12	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-1
8	OV2640	Y4 (D2)	GPIO 14	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-2
9	OV2640	Y5 (D3)	GPIO 47	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-3
10	OV2640	Y6 (D4)	GPIO 48	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-4
11	OV2640	Y7 (D5)	GPIO 17	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-5
12	OV2640	Y8 (D6)	GPIO 18	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-6
13	OV2640	Y9 (D7)	GPIO 16	Paralel 8-bit	Bus Data Piksel Bit-7
14	OV2640	VSYNC	GPIO 6	Sinyal Kontrol	Sinkronisasi Frame Vertikal
15	OV2640	HREF	GPIO 7	Sinyal Kontrol	Referensi Garis Horizontal

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

16	OV2640	PCLK	GPIO 13	Sinyal Kontrol	Clock Piksel
17	OV2640	XCLK	GPIO 15	Sinyal Kontrol	Clock Masukan Kamera

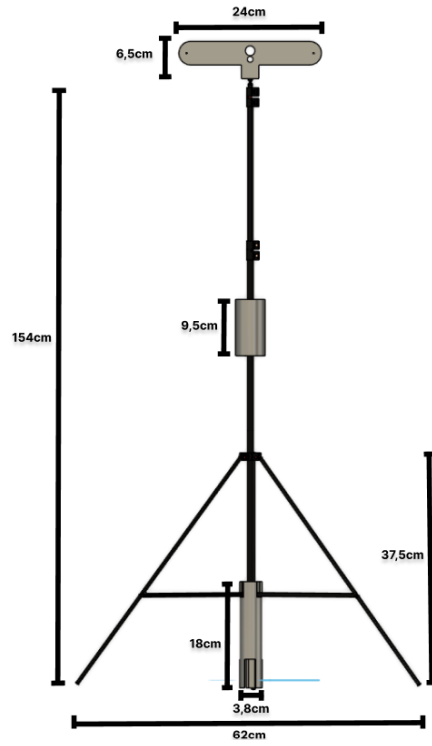
2) Desain Casing 3D

Pada aspek perancangan mekanik fisik, instrumen pemantau dipasang secara kokoh pada penyangga *tripod* berbahan aluminium dengan ketinggian elevasi 154 cm dari permukaan lantai. Kepala sensor penangkap (*head mount*) dimiringkan pada sudut presisi 43° mengarah ke bawah. Sudut kemiringan ini dirancang secara sengaja untuk memastikan bahwa *Field of View* (FoV) sensor terfokus sepenuhnya pada area lantai dan tumpukan aset, sehingga sistem dapat mendeteksi genangan air dan perubahan panas permukaan material secara optimal tanpa menangkap area langit-langit yang tidak relevan. Perancangan seluruh komponen wadah mekanik dilakukan menggunakan perangkat lunak desain berbantuan komputer Autodesk Fusion 360. Perangkat lunak ini dipilih karena kemampuannya dalam pemodelan tiga dimensi parametrik yang memungkinkan penyesuaian dimensi komponen secara presisi sesuai dengan ukuran fisik masing-masing modul elektronik. Seluruh modul sensor dan sirkuit cetak tersebut kemudian dibungkus dan dilindungi oleh wadah (*casing*) hasil cetak tiga dimensi (3D) berbahan plastik *Polylactic Acid* (PLA). Desain struktur wadah ini dirancang dalam konfigurasi tertutup (*enclosed*) guna melindungi sirkuit internal perangkat keras dari paparan debu korosif dan uap kelembapan yang umum ditemukan di lingkungan pergudangan.

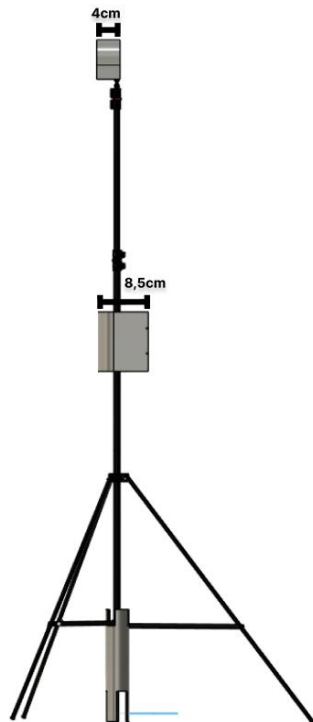


Gambar 12 Desain 3D Casing dan Tripod

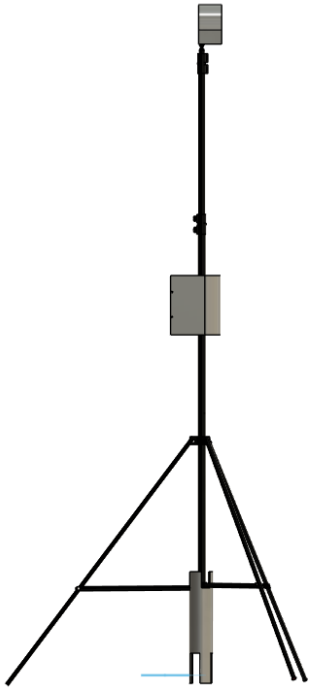
- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



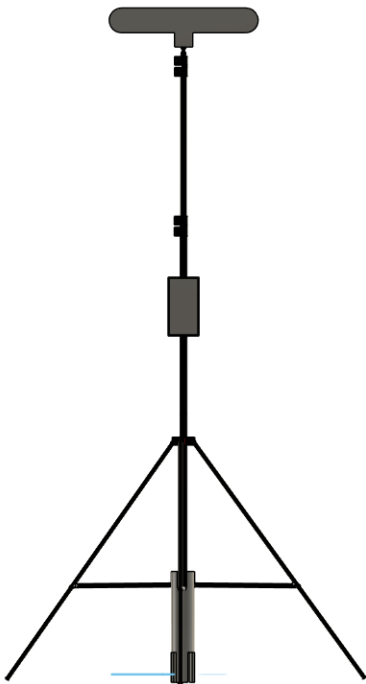
Gambar 13 Tampilan Sisi Depan Keseluruhan Sistem



Gambar 14 Tampilan Sisi Kanan Keseluruhan Sistem



Gambar 15 Tampilan Sisi Kiri Keseluruhan Sistem



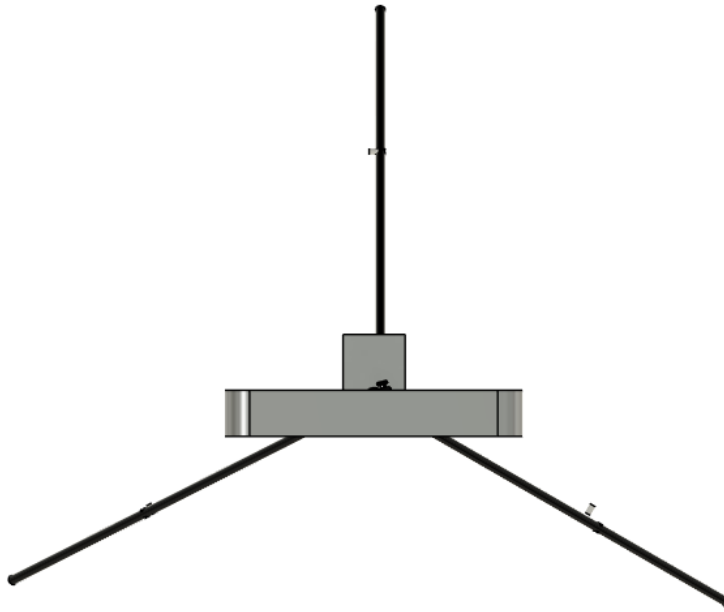
Gambar 16 Tampilan Sisi Belakang Keseluruhan Sistem

@Hak cipta milik IPB University

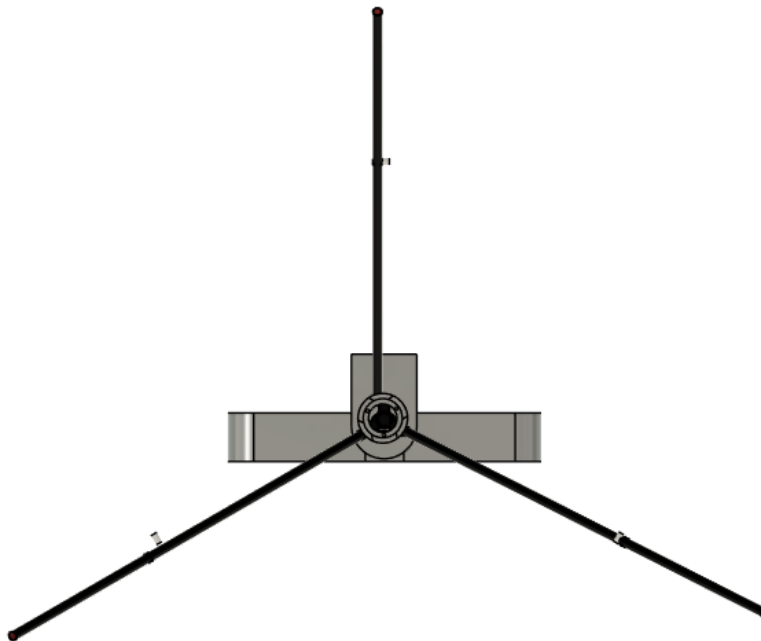
IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 17 Tampilan Sisi Atas Keseluruhan Sistem

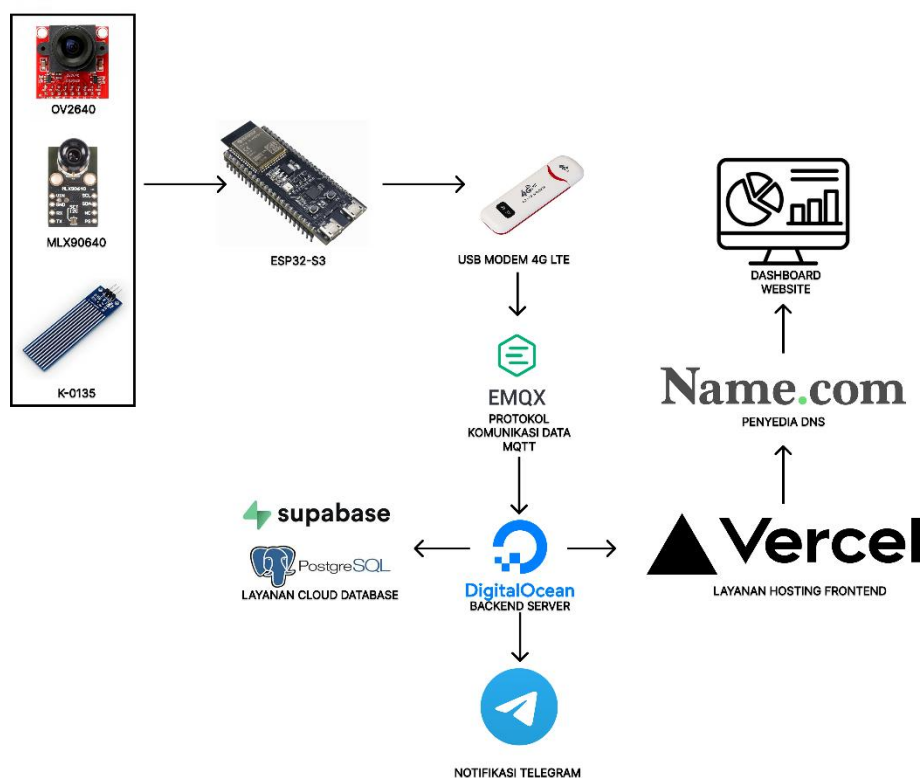


Gambar 18 Tampilan Sisi Bawah Keseluruhan Sistem

3.6.2 Perancangan Perangkat Lunak

Pengembangan perangkat lunak pada penelitian ini mengadopsi arsitektur sistem terdistribusi yang secara fungsional membagi beban komputasi menjadi dua ranah utama: komputasi sisi perangkat keras di lapangan (*edge computing*) dan pemrosesan analitik tingkat lanjut di sisi peladen (*Backend server*). Pemisahan arsitektur ini sangat krusial untuk mencegah terjadinya kelebihan beban pemrosesan, menghemat penggunaan sumber daya memori, serta menjaga stabilitas konektivitas jaringan pada perangkat IoT. Gambaran menyeluruh mengenai hubungan antarlapis sistem mulai dari lapisan persepsi sensor, lapisan

transmisi MQTT, lapisan pemrosesan server, hingga lapisan *output dashboard* dan notifikasi dapat diamati pada diagram arsitektur sistem berikut ini.



Gambar 19 Arsitektur Sistem

Gambar 19 memperlihatkan bahwa sistem bekerja secara *end-to-end* dalam empat lapisan yang saling terhubung. Lapisan pertama adalah lapisan persepsi yang terdiri dari sensor MLX90640, K-0135, dan kamera OV2640 yang terpasang pada mikrokontroler ESP32-S3. Lapisan kedua adalah lapisan transmisi yang menggunakan protokol MQTT melalui *broker* EMQX untuk meneruskan data ke server. Lapisan ketiga adalah lapisan pemrosesan di *Backend* server Node.js yang menjalankan inferensi model AI, logika *Decision Tree*, dan manajemen basis data. Lapisan keempat adalah lapisan *output* yang terdiri dari *dashboard* web *real-time* dan sistem notifikasi Telegram sebagai antarmuka akhir bagi operator.

1) *Firmware* mikrokontroler ESP32-S3

Dikembangkan secara komprehensif menggunakan bahasa pemrograman C/C++ di dalam lingkungan Arduino IDE. Perancangan perangkat lunak pada sisi perangkat ini tidak hanya difokuskan pada transmisi data (*publish*) secara asinkron (menggunakan fungsi penjadwalan `millis()` alih-alih `delay()` yang dapat memblokir proses), tetapi juga mengimplementasikan fungsi interupsi dan *callback* pada antarmuka MQTT. Mekanisme *callback* ini memungkinkan ESP32-S3 untuk terus bersiaga (*standby*) secara waktu nyata (*real-time*) guna mendengarkan instruksi dua arah dari server. Sebagai contoh, apabila algoritme pendeteksi anomali di server mencatat adanya lonjakan suhu ekstrem yang melewati ambang batas, peladen akan menembakkan perintah pemicu (*trigger command*) melalui topik MQTT. *Firmware* yang

menerima pesan tersebut akan merespons dengan secara otomatis mengeksekusi perintah pengambilan gambar visual seketika (*snapshot*) menggunakan modul kamera OV2640. Citra foto tersebut selanjutnya dikodekan ke dalam format *string* Base64 dan dipublikasikan kembali ke peladen guna menyajikan bukti autentik kondisi ruangan.

2) Backend Server

Backend server dirancang menggunakan lingkungan eksekusi Node.js dengan kerangka kerja Express.js berbasis TypeScript. Pemilihan infrastruktur ini dilandasi oleh karakteristik arsitektur *Asynchronous Non-Blocking Input/Output (I/O)* yang dimilikinya. Karakteristik ini sangat krusial karena server dituntut untuk secara simultan mengelola aliran data sensor termal beresolusi tinggi dan data tingkat genangan air yang dipublikasikan dari antarmuka protokol MQTT dengan kecepatan tinggi setiap 1 detik secara berkesinambungan, tanpa menghambat atau memblokir antrean instruksi eksekusi klien lainnya.

a) Manajemen Koneksi dan Antarmuka Komunikasi

Server mengelola dua lapisan komunikasi secara paralel. Lapisan pertama adalah antarmuka HTTP berbasis Express.js yang melayani permintaan REST API dari *frontend*. Lapisan kedua adalah protokol WebSocket menggunakan pustaka Socket.IO yang berjalan di atas server HTTP yang sama, untuk memastikan pembaruan data *real-time* ke *frontend* tanpa mekanisme *polling* berkala. Server juga berperan sebagai klien MQTT yang terhubung ke *broker* publik broker.emqx.io dan berlangganan secara simultan pada lima topik: synergy/gudang1/thermal untuk matriks termal, synergy/gudang1/water untuk data level air, synergy/gudang1/cam untuk gambar kamera berformat Base64, synergy/gudang1/threshold untuk sinkronisasi nilai ambang batas, serta synergy/gudang1/cmd sebagai kanal perintah dua arah ke *firmware* ESP32-S3.

b) Pipeline Inferensi Model AI dan Mekanisme Validasi Konsektif

Server bertindak sebagai pusat pemrosesan kecerdasan buatan dengan memuat model *Convolutional Autoencoder* ke dalam memori menggunakan pustaka TensorFlow.js dari berkas model.json dan group1-shard1of1.bin. Saat data matriks termal 768 piksel diterima melalui MQTT, *pipeline* inferensi dieksekusi secara asinkronus. Nilai median *frame* termal dihitung sebagai titik referensi sentralisasi, dipilih menggantikan *mean* karena lebih *robust* terhadap piksel suhu ekstrem yang sudah hadir saat anomali aktif terjadi. Setiap piksel kemudian dinormalisasi menggunakan parameter *rel_min* dan *rel_max* dari metadata AI, dikliping ke rentang [0, 1], lalu dimasukkan ke model sebagai *tensor* berukuran [1, 24, 32, 1]. Dari perbandingan *output* rekonstruksi dengan input aslinya, dihitung dua nilai kerugian: *MSE Loss* global dan *Pixel Loss* maksimal per piksel, yang dibandingkan dengan ambang batas *global_anomaly_threshold* (0,006) dan *local_anomaly_threshold* (0,165) untuk menghasilkan tiga klasifikasi anomali: *global*, *local*, dan *both*. Untuk menekan peringatan palsu (*false alarm*), server mengimplementasikan mekanisme validasi konsektif tiga-tik. Sebuah kejadian dinyatakan sebagai "anomali nyata" hanya apabila kondisi terdeteksi pada tiga pembacaan sensor berurutan melalui tiga penghitung independen: *consecutiveAnomaly*, *consecutiveOverheat*, dan

consecutiveWaterHigh. Apabila kondisi tidak terpenuhi pada suatu tik, penghitung direset ke nol. Mekanisme ini menjadi justifikasi teknis utama atas reduksi 65% alarm palsu dalam hasil evaluasi sistem.

c) Manajemen Peringatan dan Integrasi Kamera

Server menerapkan mekanisme *cooldown* peringatan selama 10 detik (ALERT_COOLDOWN) untuk mencegah banjir notifikasi. Karena data termal dan gambar kamera tiba melalui topik MQTT yang berbeda dan tidak selalu tersinkronisasi, server mengimplementasikan sistem *pending alert* berbasis *timer*. Apabila anomali terdeteksi namun gambar kamera belum tersedia, server menyimpan sementara objek peringatan dalam antrian pendingAlert dan menerbitkan perintah pengambilan gambar (take_pic) ke *firmware* ESP32-S3 melalui topik synergy/gudang1/cmd. Sistem kemudian menunggu kedatangan gambar tersebut maksimal selama 5 detik sebelum mengirimkan peringatan dengan atau tanpa lampiran foto.

d) Logika Klasifikasi Genangan Air Berbasis *Decision Tree*

Apabila nilai analog sensor K-0135 melebihi ambang batas 550 secara konsekutif selama tiga kali, server mengambil data cuaca terkini dari OpenWeatherMap API berdasarkan koordinat lokasi gudang. Jika kondisi cuaca mengindikasikan hujan, sistem mengklasifikasikan peringatan sebagai "Kebocoran Atap atau Rembesan Air Hujan". Jika cuaca cerah, sistem mengklasifikasikannya sebagai "Kebocoran Pipa Saluran Air atau Sumber Internal". Hasil klasifikasi ini kemudian disertakan dalam notifikasi yang dikirimkan ke grup Telegram melalui *Telegram Bot API*. Data cuaca diperbarui secara berkala di latar belakang setiap 5 menit.

e) Sistem Notifikasi Darurat Berbasis Telegram Bot API

Server terintegrasi dengan *Telegram Bot API* menggunakan pustaka node-telegram-bot-api dalam mode *non-polling* (polling: false), sehingga hanya bertugas mengirim pesan satu arah tanpa menambah beban antrian pemrosesan server. Terdapat dua fungsi notifikasi berdasarkan jenis kejadian. Fungsi pertama, sendThermalAlert(), dipanggil saat anomali termal terkonfirmasi. Fungsi ini terlebih dahulu membangkitkan citra *heatmap* termal secara terprogram menggunakan pustaka *canvas* berukuran 640×480 piksel hasil penskalaan 20× dari 768 titik data sensor MLX90640 beresolusi 32×24 dengan pemetaan warna berbasis HSL dari biru (dingin) hingga merah (panas). Apabila terdeteksi titik anomali lokal (*Hotspot*), lingkaran merah bercahaya (*glow effect*) ditambahkan secara otomatis pada koordinat piksel dengan kerugian tertinggi. *Heatmap* PNG dikirimkan ke grup Telegram disertai keterangan Markdown berisi nilai suhu, MSE Loss, Pixel Loss, dan ambang batas aktif. Jika gambar kamera OV2640 tersedia, gambar tersebut turut dilampirkan setelah dikoreksi orientasinya sebesar 180° menggunakan fungsi processCameraImage(), karena kamera dipasang secara terbalik pada *casing* 3D secara mekanis. Fungsi kedua, sendWaterAlert(), mengirim pesan teks Markdown berisi nilai sensor K-0135, kondisi cuaca terkini, dan hasil klasifikasi *Decision Tree*. Kedua fungsi dilindungi mekanisme *cooldown* 10 detik untuk mencegah duplikasi notifikasi.

f) Pengelolaan Data Historis dan Logging ke Basis Data

Server mengelola dua mekanisme penyimpanan ke basis data Supabase PostgreSQL melalui ORM Prisma. Mekanisme rutin (`startDatabaseLogger`) berjalan setiap 60 detik merekam suhu rata-rata, minimum, maksimum, level air, nilai AI *Loss*, dan kondisi cuaca. Mekanisme paksa (`forceLogToDatabase`) dipicu secara instan saat anomali nyata terdeteksi, memastikan setiap insiden tercatat tepat pada waktu kejadiannya. *Endpoint* GET `/api/history` menyediakan data historis dengan dua fitur teknis: *downsampling* adaptif yang merata-ratakan data per segmen apabila rekaman melebihi 500 titik agar grafik tetap responsif, serta deteksi sensor mati yang menyisipkan titik data bernilai *null* apabila celah waktu antar-data melebihi 5 menit, sehingga grafik tidak menampilkan garis palsu pada rentang waktu yang tidak berkesinambungan.

g) Manajemen Sesi dan Pemantauan Perangkat Aktif

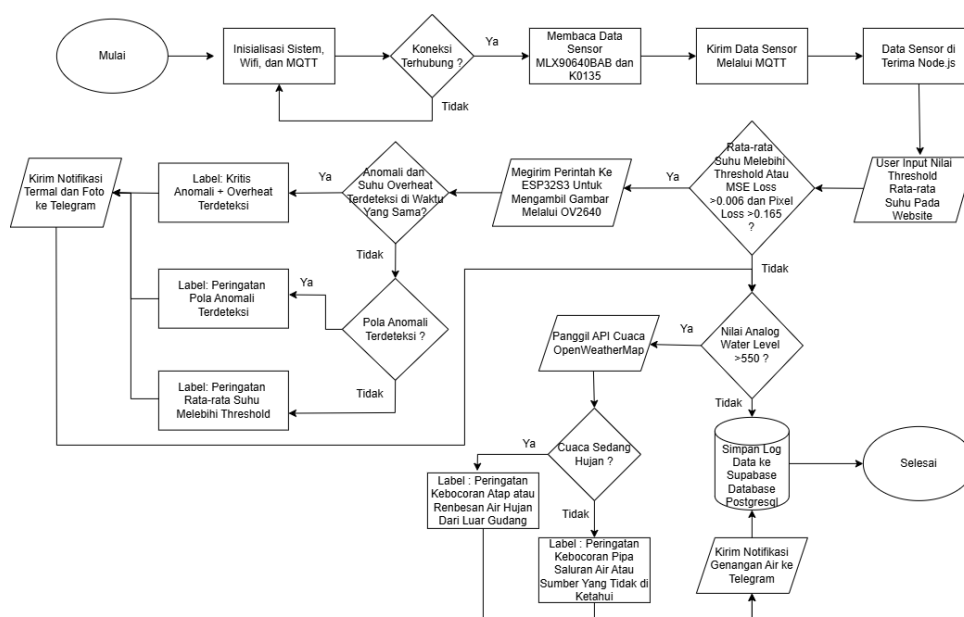
Server mengimplementasikan sistem manajemen sesi aktif untuk memantau perangkat yang mengakses *dashboard* secara *real-time*. Saat klien *frontend* melakukan autentikasi melalui *endpoint* POST `/api/track-session`, server mengurai *string* *User-Agent* HTTP menggunakan pustaka *UA-Parser* untuk mengekstrak informasi jenis perangkat, sistem operasi, nama peramban, serta merek dan model perangkat. Data sesi disimpan sementara dalam memori RAM server. Untuk mencegah akumulasi sesi *zombie*, server menjalankan pemantauan *heartbeat* setiap 15 detik yang menghapus sesi yang tidak mengirimkan sinyal keaktifan (*lastSeen*) dalam 60 detik terakhir. Setiap perubahan daftar sesi baik akibat penambahan, *logout* melalui POST `/api/remove-session`, maupun penghapusan oleh *heartbeat* segera disiarkan ke seluruh klien *frontend* melalui *event* `WebSocket sessions_updated`.

3) Frontend Aplikasi Web Dashboard

Antarmuka pengguna dikembangkan menggunakan kerangka kerja React berbasis TypeScript. Pemilihan ekosistem ini dilandasi oleh arsitektur berbasis komponen yang memungkinkan pemisahan logika tampilan secara modular, serta dukungan penuh terhadap pustaka `Socket.IO Client` untuk menerima aliran data *real-time* dari *Backend*. *Dashboard* web terbagi menjadi beberapa modul fungsional utama. Modul Pemantauan *Real-time* menampilkan *heatmap* termal yang diperbarui setiap data baru diterima melalui kanal `WebSocket`, panel indikator level air analog, serta kartu metrik AI yang menampilkan nilai MSE global dan *Pixel Loss* lokal secara langsung (*live*). Modul Grafik Deret Waktu (*Time-series*) memvisualisasikan riwayat perubahan suhu rata-rata, level air, dan nilai kerugian AI dalam bentuk grafik interaktif guna memudahkan analisis tren historis. Modul Konfigurasi *Threshold* menyediakan antarmuka input bagi operator untuk menetapkan nilai ambang batas suhu rata-rata yang kemudian dikirimkan ke *Backend* melalui *endpoint* REST API POST `/api/set-threshold`, yang selanjutnya diteruskan ke *firmware* ESP32-S3 via protokol MQTT. Modul Sesi Aktif menampilkan daftar perangkat yang sedang terhubung ke *dashboard* secara *real-time*, termasuk informasi jenis *browser*, sistem operasi, dan alamat IP, dengan memanfaatkan *event* `sessions_updated` dari `Socket.IO` dan *endpoint* GET `/api/active-sessions`. Komunikasi antara *frontend* dan *Backend* bersifat

hibrid dua arah: permintaan satu arah menggunakan arsitektur RESTful API untuk pengambilan data historis melalui *endpoint* GET /api/history dengan parameter rentang waktu, sedangkan pembaruan data *real-time* dilayani melalui protokol WebSocket yang menjamin latensi mendekati nol tanpa mekanisme *polling* berkala.

Secara keseluruhan, alur kerja operasional dari ketiga lapisan perangkat lunak tersebut saling berinteraksi membentuk sebuah siklus pemantauan yang berjalan secara kontinu dan otomatis. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai urutan logika pengambilan keputusan sistem dari awal pembacaan sensor hingga pengiriman notifikasi peringatan, alur kerja tersebut divisualisasikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) sebagaimana ditampilkan pada Gambar 20 berikut.



Gambar 20 Diagram Alir Kerja Sistem

Gambar 20 mengilustrasikan bahwa sistem memulai siklusnya dengan inisialisasi koneksi WiFi dan MQTT pada *firmware* ESP32-S3. Setelah koneksi berhasil, sensor MLX90640 membaca matriks termal 32×24 piksel setiap 1 detik dan sensor K-0135 membaca nilai analog genangan air secara bersamaan. Data termal dikirimkan ke server melalui topik MQTT untuk diproses oleh model *Convolutional Autoencoder*, yang menghasilkan nilai *MSE Loss* dan *Pixel Loss* sebagai indikator anomali. Apabila salah satu atau kedua nilai kerugian tersebut melampaui ambang batas yang telah ditetapkan secara berturut-turut selama tiga tik, sistem mengklasifikasikan kejadian sebagai anomali nyata dan memicu perintah pengambilan gambar ke kamera OV2640. Notifikasi lengkap beserta lampiran *heatmap* dan foto kamera kemudian dikirimkan ke grup Telegram, sementara data kejadian dicatat secara paksa ke basis data Supabase PostgreSQL. Siklus pembacaan sensor, inferensi model, dan pencatatan data ini berlangsung berulang secara otomatis selama sistem dalam kondisi aktif, hingga operator menekan tombol sakelar yang tersambung pada modul UPS untuk mematikan sistem secara manual, umumnya dilakukan pada saat pelaksanaan perawatan (*maintenance*) rutin gudang setiap dua bulan sekali. Penekanan tombol sakelar

off ini memutus siklus operasional sistem dan mengakhiri proses (Selesai), sehingga seluruh komponen elektronik dapat dimatikan dengan aman tanpa mencabut kabel daya utama secara langsung.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Sistem Pada Lingkungan Simulasi (TKT Level 6)

Untuk memenuhi prinsip validasi terkontrol sesuai kerangka Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) Level 6, pengujian dilaksanakan menggunakan tumpukan tiga kardus dengan total ukuran $35 \times 26,5 \times 96$ cm yang disusun menyerupai susunan aset medis. Sensor MLX90640 dipasang pada ketinggian 154 cm dari permukaan lantai dengan kepala sensor dimiringkan ke sudut 43° ke arah bawah dan alat ditempatkan pada jarak 66 cm dari kardus. Konfigurasi ini sengaja dirancang agar *Field of View* (FOV) $55^\circ \times 35^\circ$ sensor mencakup tiga sisi objek simulasi (atas, kiri, dan kanan) secara simultan. Dengan penempatan ini, jarak terdekat dari lensa sensor MLX90640 ke titik tengah pertemuan sisi atas-sisi samping tercatat sebesar 84 cm, sedangkan jarak terjauh ke sudut bawah sisi samping mencapai 170 cm. Seluruh rentang jarak tersebut masih berada dalam batas akurasi dan resolusi spasial sensor MLX90640, sehingga data termal yang diakuisisi tetap representatif terhadap kondisi permukaan aset yang dipantau. Sisi belakang dan dasar objek tidak terpantau karena secara operasional menghadap ke dinding dan lantai, yang secara alami memiliki risiko eksposur lingkungan minimal. Lingkungan tiruan ini memungkinkan evaluasi objektif terhadap stabilitas konektivitas MQTT, akurasi inferensi AI, serta respons sistem terhadap gangguan terkontrol sebelum direkomendasikan untuk *field deployment* sesungguhnya.



Gambar 21 Penempatan Sistem Pada Lingkungan Tiruan

Untuk memberikan gambaran nyata mengenai konfigurasi penempatan sistem dalam lingkungan simulasi, Gambar 21 menampilkan dokumentasi foto penempatan keseluruhan instrumen pada lingkungan pengujian, memperlihatkan posisi *tripod* pada ketinggian 154 cm beserta sudut kemiringan kepala sensor sebesar 43° ke arah bawah menuju objek pantau.

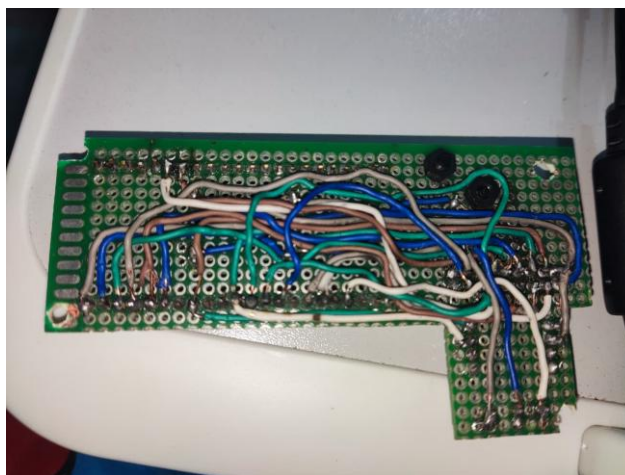


Gambar 22 Tumpukan Kardus Sedemikian Rupa Dengan Aset Gudang

Gambar 22 menunjukkan tiga tumpukan kardus dengan total dimensi $35 \times 26,5 \times 96$ cm yang disusun menyerupai tatanan tumpukan aset medis pada gudang. Susunan ini sengaja dirancang agar sensor MLX90640 dapat menangkap tiga sisi permukaan objek (atas, kiri, dan kanan) secara simultan dalam satu *frame* termal, sehingga pengujian dapat merepresentasikan kondisi pemantauan yang mendekati skenario operasional nyata.

4.2 Hasil Penyolderan dan Pemasangan Komponen Pada Casing

Proses penyolderan dan perakitan komponen dilaksanakan secara bertahap, dimulai dari pemasangan modul ESP32-S3 sebagai unit pemroses utama pada papan sirkuit cetak berlubang, dilanjutkan dengan penyolderan konektor sensor MLX90640 pada jalur I2C (SDA GPIO 8, SCL GPIO 9) dan sensor K-0135 pada jalur ADC (GPIO 4). Modul kamera OV2640 dipasangkan pada antarmuka SCCB yang berbagi jalur I2C yang sama. Seluruh komponen elektronik tersebut kemudian ditempatkan ke dalam wadah cetak tiga dimensi berbahan PLA yang telah dirancang sesuai dimensi komponen pada bagian perancangan mekanik.



Gambar 23 Hasil Penyolderan Pada PCB

Gambar 23 menunjukkan hasil akhir penyolderan pada papan sirkuit cetak berlubang, dengan seluruh jalur kabel antar-komponen meliputi ESP32-S3, sensor MLX90640, dan sensor K-0135 tertata rapi untuk meminimalkan risiko hubung singkat maupun gangguan sinyal antarkomponen. Hasil perakitan ini selanjutnya ditempatkan pada bagian kepala *casing* bersama modem USB 4G LTE, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 24 berikut.



Gambar 24 Kepala *Casing* Sistem Berisi Sensor, Modem, dan Mikrokontroler

Gambar 24 memperlihatkan hasil akhir penempatan seluruh komponen tersebut di dalam kepala *casing*, siap dipasang pada rangkaian *tripod*. Sebagai komponen pendukung keandalan daya sistem, modul UPS yang berfungsi sebagai sumber daya cadangan ditempatkan pada bagian terpisah, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 25 berikut.



Gambar 25 UPS Sistem Sebagai Daya Cadangan

Gambar 25 menampilkan modul UPS 5V 6000mAh yang terpasang dan siap berfungsi sebagai sumber daya cadangan apabila listrik utama terputus. Spesifikasi arus 3 Ampere pada modul ini dirancang untuk mengakomodasi lonjakan beban puncak yang terjadi saat ESP32-S3 memproses kompresi gambar secara bersamaan dengan transmisi WiFi. Sementara itu, komponen sensor level air K-0135 yang ditempatkan pada bagian kaki *casing* ditampilkan pada Gambar 26 berikut.



Gambar 26 Casing Kaki Sistem Berisi Water Level Sensor K0135

Gambar 26 memperlihatkan sensor K-0135 yang terpasang di bagian bawah *casing* pada posisi yang memungkinkan *probe* elektroda bersentuhan langsung dengan permukaan lantai area pemantauan, sehingga dapat mendeteksi keberadaan genangan air sedini mungkin bahkan pada ketebalan genangan yang sangat tipis.



Gambar 27 Foto Alat Dari Sisi Depan

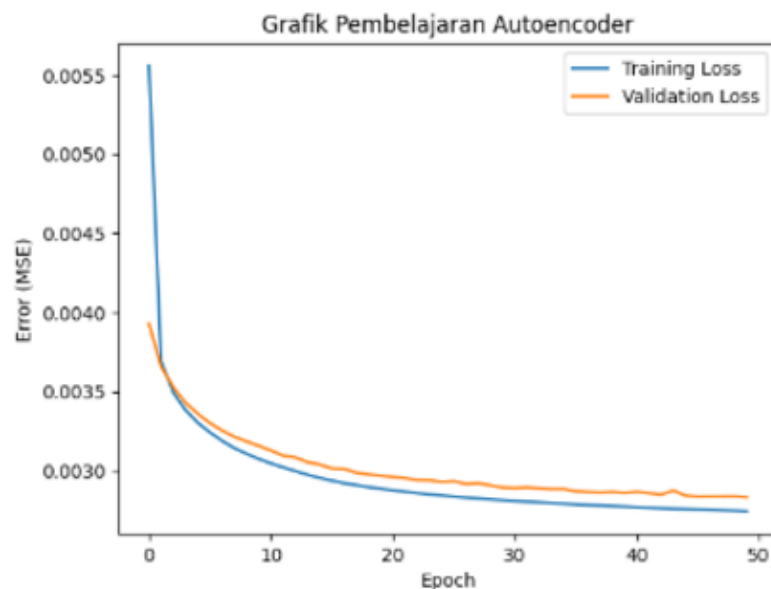
4.3 Pengumpulan dan Pra-Pemrosesan Data Sensor

Akuisisi data *baseline* dilaksanakan secara kontinu selama 4 hari 6 jam 53 menit 14 detik dalam kondisi lingkungan normal tanpa insiden. Data termal dari sensor MLX90640 berupa matriks 32×24 piksel (768 nilai/*frame*) direkam setiap 10 detik, menghasilkan sebanyak 34.560 *frame* data mentah setelah proses *cleaning*, diperoleh 24.179 sampel. Sebelum memasuki tahap pelatihan model, data mentah mengalami serangkaian transformasi matematis untuk menstabilkan distribusi spasial dan mereduksi *noise* sensor. Setiap *frame* dinormalisasi secara relatif terhadap nilai *mean frame* tersebut, diikuti oleh pemotongan persentil (0,1%–99,9%) dan penskalaan *min-max* ke rentang [0, 1]. Proses ini menjamin bahwa model berfokus pada varians pola termal, bukan pada fluktuasi suhu *ambient* harian.

4.4 Pelatihan Model Autoencoder dan Penentuan Ambang Batas

Model *Convolutional Autoencoder* dilatih menggunakan *dataset* kondisi normal selama 50 *epoch* dengan *batch size* 32, menggunakan algoritme optimasi Adam dan fungsi kerugian *Mean Squared Error* (MSE). Arsitektur model terdiri dari tiga lapisan konvolusi *encoder* (filter 16, 8, 8) diikuti oleh dua lapisan *up-sampling* dan dua lapisan konvolusi *decoder*, dengan total parameter terlatih sebanyak 3.217. Fungsi kerugian MSE mengukur seberapa akurat model merekonstruksi citra termal masukan. Semakin kecil nilai MSE, semakin akurat rekonstruksi model terhadap pola normal yang telah dipelajari. Pemilihan algoritme optimasi Adam (*Adaptive Moment Estimation*) didasarkan pada karakteristik adaptifnya yang sesuai untuk pelatihan jaringan saraf tiruan konvolusional pada

data citra dengan variasi intensitas spasial tinggi seperti citra termal inframerah. Adam menggabungkan keunggulan AdaGrad dan RMSProp secara simultan dengan menyesuaikan laju pembelajaran secara otomatis untuk setiap parameter model secara individual, menghasilkan konvergensi yang lebih stabil dibandingkan *Stochastic Gradient Descent* (SGD) konvensional (Kingma dan Ba 2015). Grafik konvergensi pada Gambar 28 menunjukkan penurunan *training loss* dan *validation loss* secara stabil hingga mencapai nilai 0,0028, mengindikasikan tidak terjadinya *overfitting*.



Gambar 28 Grafik Pembelajaran Model Autoencoder

Penetapan 50 *epoch* sebagai batas pelatihan pada penelitian ini didasarkan pada tiga justifikasi teknis yang saling mendukung.

- Bukti konvergensi empiris. Grafik pada Gambar 28 memperlihatkan bahwa kurva *training loss* dan *validation loss* keduanya telah mencapai kondisi stabil mulai sekitar *epoch* ke-35 hingga ke-50 tanpa penurunan signifikan lebih lanjut. Kondisi ini secara empiris membuktikan bahwa model telah selesai mempelajari representasi pola termal normal secara optimal sebelum batas 50 *epoch* tercapai. Peningkatan jumlah *epoch* di luar titik konvergensi tidak memberikan manfaat peningkatan akurasi yang proporsional, sebuah temuan yang konsisten dengan hasil penelitian Behrouzi *et al.* (2023) yang menunjukkan bahwa *Autoencoder* untuk deteksi anomali citra termal industri pada arsitektur sejenis umumnya mencapai konvergensi optimal dalam rentang 40–80 *epoch*.
- Karakteristik model berparameter kecil. Total parameter model yang hanya berjumlah 3.217 menjadikan arsitektur ini tergolong model berkapasitas sangat kecil (*low-capacity model*). Pada kategori model ini, penambahan *epoch* melampaui titik konvergensi justru meningkatkan risiko model mulai "menghafal" pola spesifik data latih (*overfitting*) alih-alih mempertahankan kemampuan generalisasi terhadap variasi kondisi normal yang belum pernah dilihat. Goodfellow *et al.* (2016) menegaskan bahwa pembatasan jumlah *epoch* secara eksplisit merupakan salah satu bentuk regularisasi implisit yang efektif pada model berkapasitas kecil. Kondisi *overfitting* sangat kritis pada sistem deteksi anomali berbasis *Autoencoder*: model yang *overfit* akan merekonstruksi

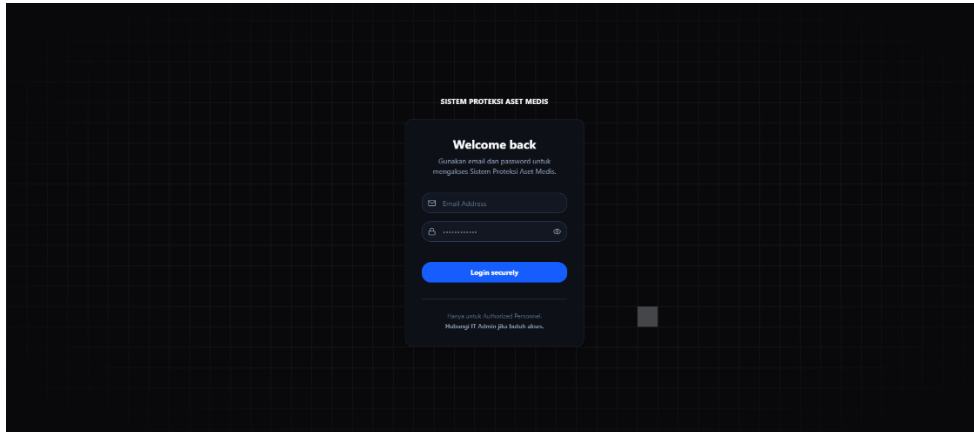
bahkan pola anomali dengan sangat akurat sehingga tidak menghasilkan *reconstruction error* yang tinggi, menyebabkan sistem gagal mendeteksi ancaman nyata di lapangan.

- c) Kesesuaian dengan praktik penelitian *Autoencoder* termal sejenis. Tilak *et al.* (2020) dalam penelitian "*Deep Autoencoder for Automatic Defect Detection in Thermal Wave Imaging*" menggunakan arsitektur *Deep Autoencoder* untuk deteksi cacat pada citra termal dan menunjukkan bahwa model *Autoencoder* termal berkonvergensi secara efektif dengan jumlah *epoch* yang terbatas apabila data latih sudah merepresentasikan seluruh variasi kondisi normal yang relevan. Hal ini selaras dengan kondisi *dataset* pada penelitian ini yang mencakup 19.343 *frame* latih yang merepresentasikan empat siklus penuh diurnal siang-malam, sehingga model tidak memerlukan iterasi berlebihan untuk mempelajari distribusi pola normal secara komprehensif.

Berdasarkan ketiga justifikasi tersebut, 50 *epoch* merupakan pilihan yang tepat dan proporsional untuk penelitian ini, cukup untuk mencapai konvergensi optimal, namun tidak berlebihan hingga mengorbankan kemampuan generalisasi model yang menjadi fondasi utama sistem deteksi anomali ini. Setelah pelatihan selesai, ambang batas anomali ditentukan secara statistik berdasarkan distribusi *reconstruction error* pada data normal. Menggunakan pendekatan deviasi standar tiga kali lipat ($\mu + 3\sigma$), sistem menetapkan dua parameter ambang batas: Ambang Batas Global (MSE) = 0,006 untuk deteksi perubahan pola ruangan secara menyeluruh, dan Ambang Batas Lokal (*Pixel Loss*) = 0,165 untuk deteksi titik panas (*Hotspot*) lokal yang tidak menaikkan suhu rata-rata. Kombinasi ambang batas ganda ini memungkinkan sistem membedakan antara anomali spasial, kenaikan suhu *ambient*, atau kondisi normal dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sistem berbasis *threshold* statis.

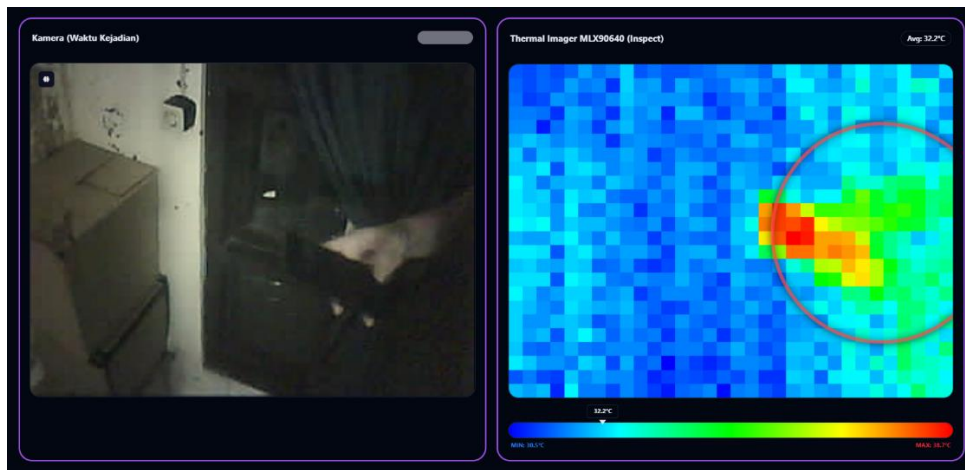
4.5 Integrasi Sistem Web Dashboard Real-time

Antarmuka pengguna berbasis web berhasil dibangun menggunakan kerangka kerja Next.js dan dapat diakses melalui peramban pada perangkat apa pun yang terhubung ke jaringan. Sebagai lapisan keamanan akses pertama, sistem menampilkan halaman autentikasi sebelum operator dapat memasuki *dashboard* utama melalui alamat domain proteksiasetsynergy.app. Untuk dapat masuk ke dalam sistem, operator diwajibkan menggunakan kredensial bawaan yang telah ditetapkan, yaitu *email* adminsinyergy@gmail.com dan kata sandi 026084120159. Terkait dengan manajemen hak akses, sistem ini menerapkan kebijakan tertutup di mana penambahan pengguna (*user*) baru tidak disediakan melalui antarmuka *dashboard*, melainkan harus diakses dan dikonfigurasi secara langsung melalui akun pangkalan data (*database*) Supabase PostgreSQL oleh administrator. Tampilan halaman autentikasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 29 berikut.



Gambar 29 Halaman *Login Website*

Gambar 30 menampilkan panel *heatmap* termal yang memvisualisasikan 768 titik data sensor MLX90640 dalam bentuk citra berwarna berukuran 640×480 piksel dengan pemetaan warna berbasis HSL warna biru untuk area bersuhu rendah dan merah untuk area bersuhu tinggi. *Heatmap* diperbarui secara otomatis setiap data baru diterima melalui kanal WebSocket.



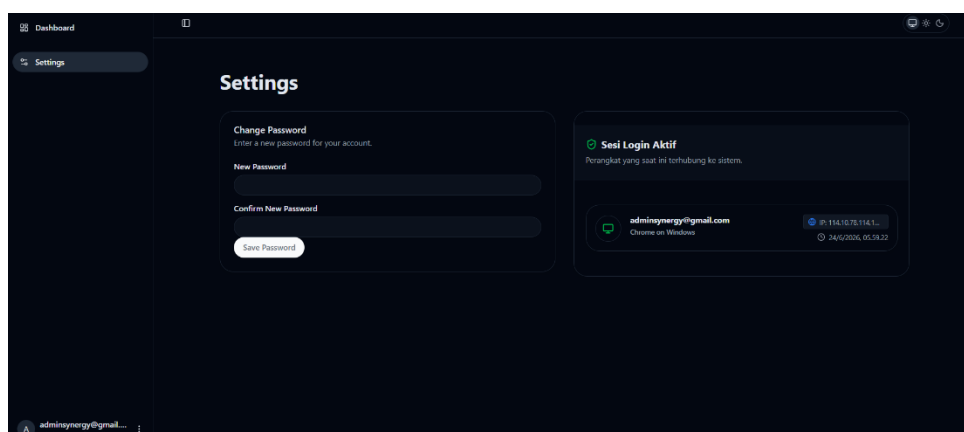
Gambar 30 Tampilan Tangkapan Foto dan *Heatmap*

Gambar 31 menampilkan grafik interaktif yang memvisualisasikan riwayat perubahan suhu rata-rata, level air, dan nilai kerugian AI dalam rentang waktu yang dapat difilter oleh operator. Titik *null* yang disisipkan secara otomatis saat sensor tidak aktif lebih dari 5 menit memastikan grafik tidak menampilkan garis palsu pada periode tanpa data.



Gambar 31 Tampilan Grafik Sensor dan Log Aktivitas

Gambar 32 memperlihatkan daftar perangkat yang sedang aktif mengakses *dashboard* secara *real-time*, mencakup informasi sistem operasi, nama peramban, serta merek dan model perangkat. Daftar ini diperbarui secara otomatis setiap 15 detik.



Gambar 32 Pengaturan Pergantian Password dan Sesi Login Aktif

4.6 Notifikasi Telegram

Sebagai lapisan peringatan akhir kepada operator, sistem berhasil mengintegrasikan notifikasi otomatis melalui *Telegram Bot API*. Ketika anomali termal terkonfirmasi melalui mekanisme validasi konsekutif tiga-tik, server secara otomatis membangkitkan dan mengirimkan pesan peringatan lengkap ke grup Telegram yang telah dikonfigurasi. Contoh notifikasi anomali termal yang berhasil dikirimkan oleh sistem:

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 33 Notifikasi Telegram Terdeteksi Anomali

Gambar 33 menampilkan pesan notifikasi anomali termal yang terdiri dari lampiran citra *heatmap* termal berformat PNG disertai keterangan lengkap berformat Markdown, memuat nilai suhu rata-rata, suhu maksimal, nilai MSE Loss beserta ambang batasnya, nilai *Pixel Loss* beserta ambang batasnya, kondisi cuaca terkini, dan rekomendasi tindakan kepada operator. Lingkaran merah yang tampak pada *heatmap* menunjukkan koordinat piksel dengan nilai kerugian rekonstruksi tertinggi sebagai penanda visual lokasi anomali. Selain *heatmap*, sistem juga melampirkan foto visual dari kamera OV2640 yang diambil secara otomatis sesaat setelah anomali terdeteksi dan telah dikoreksi orientasinya sebesar 180° secara perangkat lunak. Foto ini berfungsi sebagai bukti visual autentik yang memungkinkan operator melakukan penilaian awal kondisi ruangan dari jarak jauh sebelum melakukan inspeksi langsung. Untuk kejadian genangan air, sistem mengirimkan notifikasi dengan format yang berbeda sebagaimana ditampilkan pada Gambar 34 berikut.



Gambar 34 Notifikasi Telegram Genangan Air

Gambar 34 menampilkan pesan notifikasi genangan air yang memuat nilai analog sensor K-0135, kondisi cuaca terkini dari OpenWeatherMap, serta hasil klasifikasi sumber kebocoran berdasarkan logika *Decision Tree*. Pada contoh yang ditampilkan, kondisi cuaca terdeteksi hujan sehingga sistem mencantumkan penyebab "Kebocoran Atap atau Rembesan Air Hujan" sebagai panduan investigasi bagi operator.

4.7 Validasi Hasil Pengujian dan Kinerja Perbandingan

4.7.1 Metodologi Pengujian

Pengujian validasi dilaksanakan menggunakan pendekatan perbandingan langsung antara dua generasi sistem: Sistem Generasi Pertama yang merupakan prototipe awal hasil kerja praktik (sistem magang), dan Sistem Generasi Kedua yang merupakan sistem hasil pengembangan pada penelitian tugas akhir ini. Pendekatan perbandingan ini dipilih karena kedua sistem menggunakan perangkat keras identik (ESP32-S3, MLX90640, K-0135) dan lingkungan pengujian yang sama, sehingga perbedaan hasil secara langsung mencerminkan kontribusi arsitektur perangkat lunak yang dikembangkan. Perbedaan mendasar antara kedua sistem dapat dilihat pada Tabel 7 berikut:

Tabel 7 Perbandingan Sistem Generasi Pertama dan Generasi Kedua

Komponen	Sistem Generasi Pertama	Sistem Generasi Kedua
Ambang batas rata-rata suhu secara statis	Ya	Ya
Metode deteksi anomali termal	Tidak	MSE Loss global (>0,006) + Pixel Loss lokal (>0,165)
Model AI	Tidak	<i>Convolutional Autoencoder</i> (3.217 parameter)
Kemampuan deteksi <i>Hotspot</i> lokal	Tidak	Melalui Pixel Loss
Mekanisme anti <i>false alarm</i>	Tidak	Validasi konsekutif tiga kali
Deteksi genangan air	Ya	Ya
Integrasi cuaca	Tidak	API OpenWeatherMap
Klasifikasi Sumber Kebocoran	Tidak	<i>Decision Tree</i>

Pengujian dilaksanakan dalam tiga skenario terkontrol secara berulang sebanyak 10 kali percobaan per skenario untuk memastikan konsistensi hasil:

- 1) Skenario A: Deteksi sumber panas lokal menggunakan objek api kecil (kertas yang dibakar) sebagai simulasi *Hotspot*.
- 2) Skenario B: Pengujian *false alarm* akibat pemanasan lingkungan sekitar kardus oleh paparan sinar matahari pada siang hari di gudang.
- 3) Skenario C: Pengujian sensor genangan air beserta klasifikasi sumber kebocoran berbasis cuaca.

4.7.2 Skenario A: Pengujian Deteksi Sumber Panas Lokal (Api Kecil)

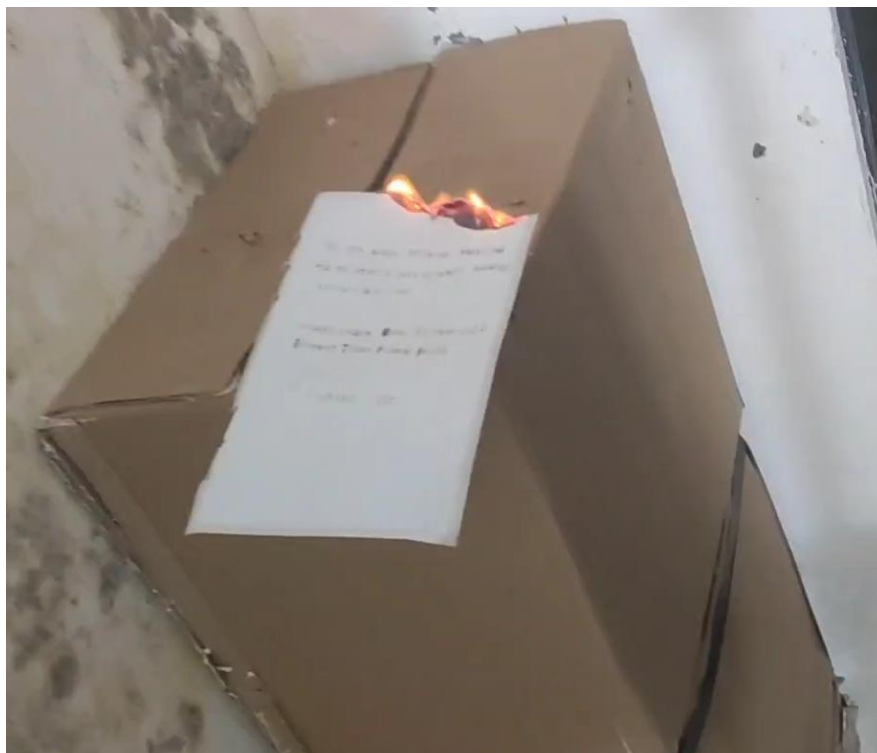
Pengujian skenario ini mereplikasi kondisi nyata deteksi dini kebakaran skala kecil, di mana sumber panas berupa selembur kertas kecil yang dibakar ditempatkan pada bagian atas kardus pada jarak ± 84 cm dari lensa sensor MLX90640. Sumber panas ini menghasilkan suhu piksel maksimal antara 264–321°C namun hanya memengaruhi 1–2 piksel dari total 768 piksel *frame* termal, sehingga nilai suhu rata-rata seluruh *frame* hampir tidak berubah dari kondisi *baseline*.

Tabel 8 Hasil Pengujian Deteksi Sumber Panas Lokal

Percobaan	Suhu Rata-rata Frame (°C)	Suhu Piksel Tertinggi (°C)	Ambang Batas Suhu Statis Rata-rata (35°C)	MSE Loss	Pixel Loss	Ambang Batas Pixel Loss (0,165)
1	32,1	287	Tidak Terlampaui	0,00194	0,724	Terlampaui
2	32,4	295	Tidak Terlampaui	0,00201	0,741	Terlampaui
3	31,8	271	Tidak Terlampaui	0,00182	0,698	Terlampaui
4	33,2	308	Tidak Terlampaui	0,00218	0,773	Terlampaui
5	32,7	289	Tidak Terlampaui	0,00197	0,729	Terlampaui
6	31,5	264	Tidak Terlampaui	0,00176	0,681	Terlampaui
7	33,5	315	Tidak Terlampaui	0,00229	0,789	Terlampaui
8	32,9	293	Tidak Terlampaui	0,00203	0,747	Terlampaui
9	32,2	279	Tidak Terlampaui	0,00188	0,712	Terlampaui
10	33,8	321	Tidak Terlampaui	0,00236	0,803	Terlampaui
Hasil	Rata-rata 32,6	Rata-rata 292,2	Ambang Batas Statis Rata-rata Suhu Tidak Dapat Mendeteksi Anomali	Rata-rata 0,00202	Rata-rata 0,740	10/10 Mendeteksi Anomali Melalui Pixel Loss

Hasil pengujian pada Tabel 8 mengungkapkan keterbatasan fundamental sistem generasi pertama. Meskipun suhu piksel terpanas mencapai rata-rata 292,2°C jauh melampaui nilai wajar kondisi gudang nilai suhu rata-rata seluruh *frame* hanya mencapai 32,6°C. Karena sumber panas kecil hanya memengaruhi 1–2 piksel dari 768 piksel, nilainya terlarut dalam proses rata-rata sehingga tidak pernah melampaui *threshold* 35°C. Sistem generasi pertama gagal mendeteksi ancaman pada seluruh 10 percobaan (0% *detection rate*). Sebaliknya, sistem generasi kedua berhasil mendeteksi seluruh 10 percobaan (100% *detection rate*) melalui mekanisme *Pixel Loss*. Nilai *MSE Loss* global pada semua percobaan berada di bawah *threshold* 0,006 (rata-rata 0,00202), yang berarti bahkan metrik *MSE* global pun tidak cukup sensitif untuk mendeteksi *Hotspot* skala kecil ini. Inilah justifikasi teknis utama diadopsinya ambang batas ganda: *Pixel Loss* lokal

(rata-rata 0,740) jauh melampaui *threshold* 0,165 dan menjadi satu-satunya mekanisme yang mampu menangkap anomali lokal berskala piksel tunggal ini.



Gambar 35 Pengujian Pada Kertas Yang Dibakar

4.7.3 Skenario B: Pengujian False Alarm Akibat Pemanasan Lingkungan

Berbeda dengan Skenario A dan C yang diujicobakan secara aktif, pengujian skenario ini dilaksanakan secara observasi pasif dengan merekam seluruh kejadian alarm yang terpicu secara alami akibat perubahan suhu lingkungan tanpa pemberian rangsangan buatan. Pengujian dilaksanakan dengan memantau *log* sistem selama 4 hari pada periode siang hari pukul 12.04–16.45 WIB, saat intensitas paparan sinar matahari tertinggi menyebabkan dinding gudang memancarkan radiasi inframerah yang turut tertangkap oleh sensor MLX90640. Pada kondisi ini, dinding gudang yang terpapar sinar matahari mengalami kenaikan suhu permukaan yang mendorong nilai rata-rata seluruh *frame* termal melampaui *threshold* statis 35°C pada sistem generasi pertama, meskipun tidak ada ancaman nyata terhadap aset yang dipantau. Rekaman *log* kejadian alarm selama 4 hari pengujian disajikan pada Tabel 9 berikut:

Tabel 9 Hasil Pengujian *False Alarm* Pada Siang Hari

Hari	Periode Observasi	Alarm Palsu Sistem Generasi Pertama	Alarm Palsu Sistem Generasi Kedua	Selisih
1	Siang Hari	11 Kejadian	4 Kejadian	7
2	Siang Hari	10 Kejadian	3 Kejadian	7
3	Siang Hari	9 Kejadian	4 Kejadian	5
4	Siang Hari	10 Kejadian	3 Kejadian	7

Total	4 Hari	40 Kejadian	14 Kejadian	26 Kejadian
-------	--------	-------------	-------------	-------------

Berdasarkan Tabel 9, sistem generasi pertama memicu total 40 kejadian alarm palsu selama 4 hari observasi, sedangkan sistem generasi kedua hanya menghasilkan 14 kejadian dalam periode yang sama. Tingkat reduksi alarm palsu dihitung sebagai berikut:

$$\text{Reduksi Alarm Palsu} = \frac{40 - 14}{40} \times 100\% = \frac{26}{40} \times 100\% = 65\%$$

Keberhasilan reduksi 65% ini disebabkan oleh kemampuan model *Convolutional Autoencoder* dalam membedakan pemanasan dinding dan lingkungan sekitar yang bersifat gradual dan spasial merata dari anomali yang bersifat lokal dan tiba-tiba. Pemanasan dinding oleh sinar matahari tidak mengubah pola distribusi suhu relatif antarpiksel secara signifikan dari kondisi *baseline* pelatihan, sehingga model tetap mampu merekonstruksinya dengan nilai *MSE Loss* dan *Pixel Loss* di bawah kedua *threshold* (0,006 dan 0,165). Operator yang sebelumnya menerima rata-rata 10 notifikasi palsu per hari pada periode siang hari berpotensi mengalami *alarm fatigue*, yakni kondisi di mana operator cenderung mengabaikan notifikasi akibat terlalu seringnya peringatan palsu masuk. Sistem generasi kedua berhasil mengeliminasi risiko tersebut secara signifikan.

4.7.4 Skenario C: Pengujian Sensor Genangan Air dan Sumber Kebocoran

Pengujian skenario ini mensimulasikan kondisi genangan air dengan menuangkan air secara terkontrol di sekitar sensor K-0135 hingga nilai analog melampaui *threshold* 550. Pengujian dilaksanakan pada 10 percobaan dengan variasi kondisi cuaca yang berbeda (6 percobaan saat kondisi hujan dan 4 percobaan saat kondisi tidak hujan) untuk menguji akurasi logika klasifikasi *Decision Tree*.

Tabel 10 Hasil Pengujian Deteksi Genangan Air dan Sumber Kebocoran

Percobaan	Nilai Analog	Status Cuaca	Sistem Generasi Pertama	Sistem Generasi Kedua
1	713	Hujan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Atap / Rembesan Air Hujan Dan Nilai Analog >550
2	601	Hujan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Atap / Rembesan Air Hujan Dan Nilai Analog >550
3	613	Hujan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Atap / Rembesan Air Hujan Dan Nilai Analog >550

4	569	Hujan Ringan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Atap / Rembesan Air Hujan Dan Nilai Analog >550
5	3645	Hujan Sedang	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Atap / Rembesan Air Hujan Dan Nilai Analog >550
6	1078	Hujan Ringan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Atap / Rembesan Air Hujan Dan Nilai Analog >550
7	2284	Berawan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Pipa / Internal Dan Nilai Analog >550
8	596	Berawan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Pipa / Internal Dan Nilai Analog >550
9	1057	Berawan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Pipa / Internal Dan Nilai Analog >550
10	2391	Berawan	Hanya Notifikasi Nilai Analog >550	Kebocoran Pipa / Internal Dan Nilai Analog >550
Hasil	-	-	Tidak Ada Klasifikasi Sumber Kebocoran	Terdapat Klasifikasi Sumber Kebocoran

Hasil pengujian Tabel 10 menunjukkan bahwa kemampuan deteksi dasar (mengetahui adanya genangan) dimiliki oleh kedua sistem dengan tingkat keberhasilan 10/10. Sistem generasi pertama hanya mampu mengonfirmasi bahwa genangan terjadi tanpa memberikan informasi tindak lanjut kepada operator, sedangkan sistem generasi kedua berhasil mengklasifikasikan seluruh 10 percobaan dengan klasifikasi yang tepat (akurasi 100%) berdasarkan integrasi data cuaca *real-time* dari OpenWeatherMap. Kemampuan klasifikasi ini memungkinkan operator untuk segera menentukan prioritas penanganan apakah perlu memanggil teknisi atap atau teknisi instalasi pipa tanpa harus melakukan inspeksi visual terlebih dahulu.



Gambar 36 Pengujian Menuangkan Air Disekitar *Water Level Sensor*

4.7.5 Rekapitulasi Perbandingan Kinerja dan Analisis Metrik

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian dari tiga skenario evaluasi, terdapat dua dimensi peningkatan utama yang dihasilkan dari pengembangan sistem ini. Pada dimensi sensitivitas, penerapan model *Convolutional Autoencoder* dengan evaluasi *Pixel Loss* per piksel meningkatkan kemampuan deteksi anomali lokal secara absolut sebesar 100% dibandingkan pendekatan *threshold* rata-rata statis. Peningkatan ini bersifat fundamental karena memungkinkan sistem mendeteksi ancaman yang secara fisik nyata namun tidak terepresentasikan pada nilai rata-rata *frame*. Pada dimensi spesifisitas, kombinasi arsitektur model *Autoencoder*, pra-pemrosesan *Zero-Mean*, dan mekanisme validasi konsektif tiga-tik berhasil mereduksi alarm palsu sebesar 65%, dari 40 kejadian menjadi 14 kejadian dalam periode observasi yang sama. Selain dua dimensi utama tersebut, integrasi *Decision Tree* dengan data cuaca *real-time* memberikan nilai tambah klasifikasi berupa klasifikasi sumber kebocoran air dengan akurasi 100%, sebuah kapabilitas yang sama sekali tidak dimiliki oleh sistem generasi pertama. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini memvalidasi bahwa sistem yang dikembangkan telah memenuhi kriteria TKT Level 6 prototipe yang berfungsi penuh dan terdemonstrasikan dalam lingkungan simulasi yang relevan dengan kondisi operasional nyata.

Tabel 11 Rekapitulasi Lengkap Seluruh Metrik Pengujian

Aspek Evaluasi	Sistem Generasi Pertama	Sistem Generasi Kedua	Peningkatan
Rata-rata Deteksi <i>Hotspot</i> lokal	0%	100%	+100%

Reduksi Alarm Palsu Pada Siang Hari	0%	65%	+65%
Akurasi Klasifikasi Penyebab Kebocoran Air	0%	100%	+100%
Mendeteksi Pola Spasial	Tidak Ada	Ya (MSE Loss)	Fitur Baru
Mendeteksi Piksel Tunggal	Tidak Ada	Ya (Pixel Loss)	Fitur Baru

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

- 1) Arsitektur sistem *Internet of Things* berbasis ESP32-S3 berhasil dirancang dan dibangun secara terintegrasi, mencakup akuisisi data sensor MLX90640 dan K-0135, transmisi data melalui protokol MQTT, serta infrastruktur *Backend* berbasis Node.js dan basis data *cloud* Supabase PostgreSQL, terbukti mampu beroperasi stabil selama pengujian TKT Level 6.
- 2) Model *Convolutional Autoencoder* dengan arsitektur tiga lapisan konvolusi *encoder* (16, 8, 8 filter) dan dua lapisan konvolusi *decoder* (16, 1 filter) yang berjumlah total 3.217 parameter terbukti mampu mempelajari pola termal normal gudang aset medis dengan baik, dibuktikan oleh konvergensi *training-validation loss* pada nilai 0,0028 tanpa terjadinya *overfitting*.
- 3) Strategi ambang batas ganda berbasis aturan empiris 3-Sigma yang menggabungkan metrik *Mean Squared Error* global ($\tau_{global} = 0,006$) dengan metrik *Pixel Loss* lokal ($\tau_{local} = 0,165$) berhasil mereduksi alarm palsu sebesar 65% dan meningkatkan sensitivitas deteksi anomali lokal sebesar 100% dibandingkan sistem berbasis ambang batas statis.
- 4) Logika *Decision Tree* berbasis aturan yang mengintegrasikan pembacaan sensor K-0135 dengan data cuaca *real-time* OpenWeatherMap API berhasil mengklasifikasikan sumber kebocoran air dengan akurasi 100% pada 10 pengujian.
- 5) Seluruh komponen telah berhasil diintegrasikan ke dalam *dashboard* web *real-time* dengan visualisasi *heatmap* termal, pemicuan kamera OV2640 otomatis saat anomali terdeteksi, dan notifikasi Telegram Bot yang memiliki latensi rendah serta dilengkapi mekanisme validasi konsektif tiga-tik anti-noise.

5.2 Saran

Untuk pengembangan tahap selanjutnya, disarankan melakukan migrasi ke *Edge AI* dengan mengonversi model ke format TensorFlow Lite Micro agar dapat dijalankan langsung secara komputasi lokal pada mikrokontroler ESP32-S3, guna mengurangi ketergantungan sistem pada koneksi *cloud*. Selain itu, diperlukan uji lapangan jangka panjang di gudang operasional PT Synergy Dua Kawan Sejati untuk melakukan *fine-tuning* terhadap ambang batas pada skenario nyata. Ekspansi sistem dengan mengintegrasikan sensor lingkungan tambahan, seperti DHT22 (suhu dan kelembapan udara ruang) atau MQ-135 (kualitas udara), juga sangat direkomendasikan untuk memperkaya konteks analisis sistem dalam mencegah pertumbuhan jamur maupun korosi pada aset medis secara holistik. Lebih jauh, mengingat hasil pengujian Skenario A menunjukkan kemampuan sistem mendeteksi lonjakan suhu ekstrem hingga 321°C akibat sumber api kecil, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi pengembangan fitur deteksi dini kebakaran (*early fire detection*) dengan mengklasifikasikan rentang nilai *Pixel Loss* atau suhu piksel ke dalam beberapa tingkat keparahan misalnya anomali ringan, sedang, dan

kritis/berpotensi kebakaran sehingga notifikasi yang dikirimkan dapat lebih informatif dalam membedakan urgensi tindakan yang diperlukan oleh operator.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR PUSTAKA

- Batubara, M. P., Rivai, M., & Mujiono, T. (2022). Sistem Inspeksi Panas Kabel Menggunakan Kamera Termal dan Neural Network untuk Pencegahan Potensi Kebakaran. *Jurnal Teknik ITS*, 11(3).
<https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i3.95537>
- Behrouzi, S., Dix, M., Karampanah, F., Ates, O., Sasidharan, N., Chandna, S., & Vu, B. (2023). Improving Visual Defect Detection and Lokalization in Industrial Thermal Images Using Autoencoders. *Journal of Imaging*, 9(7).
<https://doi.org/10.3390/jimaging9070137>
- Blake, M., Gracia, M., Uregen, J., Brown, E., Romito, K., Stucky, C., Mitchell, C., & Atwood, B. (2025). Best Practices for Storage of Reusable Medical Devices in the Military Health System. *Military Medicine*, 190,
<https://doi.org/10.1093/milmed/usaf023>
- Cahyono, A. D., Zeho, F. H., & Noviyasari, E. (2023). ANALISIS SISTEM MANAJEMEN DALAM PEMELIHARAAN ALAT MEDIS DI RSUD KABUPATEN KEDIRI. *JURNAL PENELITIAN KEPERAWATAN*, 9(2).
<https://doi.org/10.32660/jpk.v9i2.694>
- Chidurala, V., & Li, X. (2022). Detection of moving objects using thermal imaging sensors for occupancy estimation. *Internet of Things (Netherlands)*, 17.
<https://doi.org/10.1016/j.IoT.2021.100487>
- Darwis, M. (2021). Teknik Interpolasi Bikubik untuk Memperbesar Gambar Hasil Pemetaan Suhu dari Sensor MLX90640 pada Praktikum Mikrokontroller. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 3(1).
<https://doi.org/10.14710/jplp.3.1.36-46>
- Dipahayu, D., Butsianto, M., & Ebtavany, T. G. (2018). Pengaruh Linen Bedah Rekondisi terhadap Shelf-Life Linen Bedah Steril di CSSD Rumah Sakit “X” Surabaya. *Journal Pharmasci (Journal of Pharmacy and Science)*, 3(1).
<https://doi.org/10.53342/pharmasci.v3i1.71>
- Firmansyah, A., & Syofian, S. (2024). Perancangan Sistem Gudang Cerdas untuk Pemantauan Lingkungan Gudang Berbasis Internet of Things (IoT). *Journal TIFDA (Technology Information and Data Analytic)*, 1(2), 20-24.
<https://doi.org/10.70491/tifda.v1i2.34>
- Firmansyah, H., & Indrasari, W. (2025). Internet of Things-Based Real-time Thermal Monitoring: Utilizing the Affordable MLX90640 Thermal Camera and the Industrial MAX6675 Thermocouple Module with a Linear Regression Characterization Method. *POSITRON*, 15(1), 81-91.
<https://doi.org/10.26418/positron.v15i1.89878>
- Habibi, M. W., Bhawiyuga, A., & Basuki, A. (2018). Rancang Bangun IOT Cloud Platform Berbasis Protokol Komunikasi MQTT. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 2(2).
- Kremer, T. A., Carfaro, C., & Klacik, S. (2023). Effects of Time, Temperature, and Humidity on Soil Drying on Medical Devices. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 57(2). <https://doi.org/10.2345/0899-8205-57.2.58>
- Ningsi, I. R., Kumajas, S. C., & Santa, K. (2025). Sistem Monitoring dan Controlling Suhu Serta Kelembaban Gudang Farmasi Dinas Kesehatan Kabupaten Minahasa Berbasis Internet Of Things (IoT) Menggunakan

Algoritma Fuzzy Tsukamoto. *Jurnal Minfo Polgan*, 14(2), 2195-2208. <https://doi.org/10.33395/jmp.v14i2.15412>

Pratama, A. P., Maulana, F. S., & Kusumadiarti, R. S. (2021). Sistem Pemantauan Ketebalan Debu & Suhu Pada Ruangan Menggunakan Aplikasi Telegram berbasis IoT. *JATISI (Jurnal Teknik Informatika Dan Sistem Informasi)*, 8(4). <https://doi.org/10.35957/jatisi.v8i4.1191>

Prinanto, A. Y., Rivai, M., & Setiawan, R. (2022). Diagnostics of Magnetron Transmitter System using Thermal Camera and Neural Network. *2022 1st International Conference on Information System and Information Technology, ICISIT 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICISIT54091.2022.9872884>

Rusimanto, P. W., Endryansyah, Anifah, L., Harimurti, R., & Anistyasari, Y. (2021). Implementation of arduino pro mini and ESP32 cam for temperature monitoring on automatic thermogun IoT-based. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 23(3). <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i3.pp1366-1375>

Saputra, K., al Rasyid, M. U. H., & Hadi, Muh. Z. S. (2022). Deteksi Kebocoran Pipa Air Menggunakan Machine Learning dengan Jaringan Nirkabel IEEE 802.15.4. *INOVTEK Polbeng - Seri Informatika*, 7(1). <https://doi.org/10.35314/isi.v7i1.2360>

Shubha, B., & Shastrimath, V. V. D. (2023). Study and Analysis of Thermal Imaging Sensors for Object Detection. *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.14445/23488549/IJECE-V10I5P104>

Sumanto, & Maghfiroh, R. E. (2019). Efek Temperatur Terhadap Laju Korosi. *Jurnal Flywheel*, 10(1).

Tilak, V. G., Ghali, V. S., Kumar, A. D., Sankar, K. B. S., & Sharanya, V. S. N. S. (2020). Deep Autoencoder for automatic defect detection in thermal wave imaging. *Journal of Green Engineering*, 10(12).

Vickriyal Nadith, Muhammad Rezal, Nanda Aula Rumana, & Muhammad Fuad Iqbal. (2025). Identifikasi Faktor Risiko Fisik di Ruang Penyimpanan Rekam Medis Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi. *SEHATMAS: Jurnal Ilmiah Kesehatan Masyarakat*, 4(2), 576-586. <https://doi.org/10.55123/sehatmas.v4i2.5067>

Wardana, C., Sijabat, S., Abdillah, K., & Dabukke, H. (2022). RANCANG BANGUN SENSOR WATER LEVEL K-0135 PADA ALAT SUCTION PUMP. *JURNAL MUTIARA ELEKTROMEDIK*, 6(2). <https://doi.org/10.51544/elektromedik.v6i2.3565>

Yadav, N. (2024). IoT Based Smart Irrigation System Using Weather Forecasting. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 13(1). <https://doi.org/10.21275/sr24114035017>

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning* by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. *Nature*, 29(7553).

Kingma, D. P., & Ba, J. L. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*.

Rhachi, H., Balboul, Y., & Bouayad, A. (2025). Enhanced Anomaly Detection in IoT Networks Using Deep Autoencoders with Feature Selection Techniques. *Sensors*, 25(10). <https://doi.org/10.3390/s25103150>