



Pengembangan Sistem Deteksi Kehadiran Manusia Berbasis AIoT Menggunakan Grove Vision AI V2 untuk Pemantauan Lingkungan Cerdas

Jufri¹, Dori Gusti Alex Candra², Yudi Herdiana³, Nurul Umami⁴, Kurniati Rahmadani⁵

¹Teknologi Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknik, Institut Teknologi Mitra Gama, Duri-Riau, Indonesia

²Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknik, Institut Teknologi Mitra Gama, Duri-Riau, Indonesia

³Informatika, Teknologi Informasi, Universitas Bale Bandung, Kabupaten Bandung, Indonesia

⁴Teknologi Informasi, Institut Teknologi dan Kesehatan Aspirasi, Lombok Timur, Indonesia

⁵Pendidikan Teknologi Informasi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Bina Bangsa, Serang, Indonesia

¹juft2022@gmail.com, ²dorigustialexcandra@gmail.com, ³yudiherdiana@unibba.ac.id, ⁴nurulumamy27@gmail.com,

⁵kurniatirahmadhani@gmail.com

Abstract

Conventional human presence detection systems in today's smart environmental infrastructure generally still rely on passive sensors that are prone to false alarms and lack visual identification capabilities. To address these limitations, this study proposes a decentralized Artificial Intelligence of Things (AIoT) methodological architecture based on Embedded AI using the Grove Vision AI V2 module. The scientific novelty of this research lies in the decoupling of extra-low-power spatial vision inference computation on the Himax WiseEye2 HX6538 coprocessor from asynchronous network transmission management via the XIAO ESP32C3 microcontroller. This approach structurally shifts the surveillance paradigm to an event-driven system using the MQTT protocol. The inference data is transmitted to a local Raspberry Pi 4B server to be visualized on the Home Assistant dashboard, logged for historical reference, and used to trigger Telegram notifications, which are also supported by local monitoring via an OLED interface. Testing was evaluated using 300 operational session samples under varying light intensities (100–800 lux) and spatial distances (1–3 meters). Statistical test results show consistent classification performance with an average Accuracy of 94.00% and an F1-Score of 94.96%. Telemetry transmission recorded highly responsive latency (54.80 ms) with highly efficient active inference power consumption of only 0.22 W. This research demonstrates that a decentralized Edge AI architecture can provide reliable surveillance, reduce energy consumption, and significantly enhance user visual data privacy by minimizing the risk of information leaks through the elimination of cloud computing.

Keywords: *Embedded AI, AIoT, Grove Vision AI V2, MQTT, Smart Environment.*

Abstrak

Sistem deteksi kehadiran manusia konvensional pada infrastruktur lingkungan cerdas saat ini umumnya masih bergantung pada sensor pasif yang rentan terhadap alarm palsu dan tidak memiliki kapabilitas identifikasi visual. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan arsitektur metodologis Artificial Intelligence of Things (AIoT) terdesentralisasi berbasis Embedded AI menggunakan modul Grove Vision AI V2. Kebaruan ilmiah (novelty) penelitian ini terletak pada pemisahan beban (decoupling) antara komputasi inferensi visi spasial berdaya ekstra-rendah pada koprosesor Himax WiseEye2 HX6538 dengan manajemen transmisi jaringan asinkron melalui mikrokontroler XIAO ESP32C3. Pendekatan ini secara struktural mengubah paradigma pengawasan menjadi sistem berorientasi peristiwa (event-driven) menggunakan protokol MQTT. Data inferensi didistribusikan menuju peladen lokal Raspberry Pi 4B untuk divisualisasikan pada dasbor Home Assistant, dicatat secara historis, dan memicu notifikasi Telegram, yang turut didukung pemantauan lokal via antarmuka OLED. Pengujian dievaluasi melalui 300 sampel sesi operasional di bawah variasi intensitas cahaya (100–800 lux) dan degradasi jarak spasial (1–3 meter). Hasil uji statistik menunjukkan performa klasifikasi yang konsisten dengan rata-rata Accuracy 94,00% dan F1-Score 94,96%. Transmisi telemetri mencatatkan latensi yang sangat responsif (54,80 ms).

ms) dengan konsumsi daya inferensi aktif yang sangat efisien, yakni hanya sebesar 0,22 W. Penelitian ini membuktikan bahwa arsitektur Edge AI terdesentralisasi mampu menghadirkan pengawasan yang andal, menekan konsumsi energi, serta secara signifikan meningkatkan privasi data visual pengguna dengan mereduksi risiko kebocoran informasi akibat eliminasi komputasi cloud.

Kata kunci: Embedded AI, AIoT, Grove Vision AI V2, MQTT, Smart Environment.

© 2026 Author
Creative Commons Attribution 4.0 International License



1. Pendahuluan

Transformasi digital yang masif pada dekade terakhir telah mendorong pergeseran paradigma dalam pengelolaan infrastruktur lingkungan cerdas (*smart environment*) [1]. Penerapan Internet of Things (IoT) pada berbagai sektor, seperti perkantoran cerdas (*smart office*), ruang kelas cerdas (*smart classroom*), laboratorium cerdas (*intelligent laboratory*), hingga sistem otomasi gedung (*smart building*), telah menjadi fondasi utama dalam menciptakan ekosistem yang efisien, adaptif, dan responsif terhadap kebutuhan manusia [2]. Salah satu komponen fundamental yang menentukan keberhasilan sistem otomasi pada lingkungan cerdas adalah kemampuan deteksi kehadiran manusia (*human presence detection*) secara akurat dan realtime. Informasi mengenai kehadiran, lokasi, dan jumlah manusia di dalam suatu ruangan menjadi parameter esensial bagi sistem pengambilan keputusan otomatis [3]. Data ini krusial untuk mendukung berbagai fungsi vital, mulai dari optimasi manajemen energi seperti pengendalian pencahayaan dan penyejuk udara, peningkatan sistem keamanan fisik, pengaturan akses ruangan, hingga pemantauan aktivitas operasional secara komprehensif [4]. Tanpa adanya sistem deteksi kehadiran manusia yang handal, otomasi lingkungan cerdas akan kehilangan konteks situasionalnya sehingga berpotensi gagal mencapai tingkat efisiensi yang diharapkan [5].

Secara historis, metode pendeteksian kehadiran manusia pada sistem otomasi umumnya sangat bergantung pada penggunaan sensor konvensional seperti sensor *Passive Infrared* (PIR), sensor ultrasonik, maupun sensor gelombang mikro [6]. Meskipun sensor-sensor ini memiliki keunggulan dalam hal kemudahan instalasi, pendekatan ini memiliki keterbatasan bawaan yang cukup signifikan. Sensor konvensional tersebut beroperasi berdasarkan prinsip deteksi perubahan radiasi panas inframerah atau pantulan gelombang suara. Oleh karena itu, sensor ini pada dasarnya hanya mampu mendeteksi keberadaan atau pergerakan suatu entitas, tanpa memiliki kapasitas untuk menyediakan informasi visual maupun atribut detail yang memadai untuk proses identifikasi objek secara spesifik [7]. Hal ini menimbulkan tantangan serius berupa ketidakmampuan sistem dalam membedakan secara pasti antara manusia dan objek bergerak lainnya.

Lebih jauh lagi, sensor seperti PIR sering kali gagal mendeteksi manusia yang sedang dalam kondisi diam, sehingga menghasilkan kesalahan deteksi (*false negative*) yang menurunkan keandalan sistem pada kondisi lingkungan yang dinamis [8].

Menjawab tantangan tersebut, perkembangan paradigma *Artificial Intelligence of Things* (AIoT) telah membuka dimensi baru dalam sistem pemantauan. AIoT memadukan kemampuan persepsi perangkat IoT dengan kecerdasan kognitif dari *Artificial Intelligence* (AI), menghasilkan sistem monitoring yang jauh lebih responsif, dan memiliki kapabilitas pengambilan keputusan secara otonom di titik terluar jaringan [9]. Sejalan dengan hal tersebut, evolusi arsitektur *Edge Computing* telah merevolusi cara pemrosesan data. *Edge computing* memfasilitasi eksekusi inferensi *machine learning* dan *computer vision* agar dapat dijalankan secara langsung pada perangkat keras yang berada dekat dengan sumber data (*edge devices*) [10]. Perpindahan beban komputasi dari server terpusat (*cloud*) menuju perangkat *edge* memberikan sejumlah keuntungan strategis yang sangat krusial bagi aplikasi realtime. Pendekatan ini secara drastis mampu mereduksi latensi komunikasi, meminimalisasi konsumsi *bandwidth* jaringan, menghilangkan ketergantungan yang kaku terhadap internet berkecepatan tinggi, serta yang paling utama adalah meningkatkan perlindungan privasi data secara signifikan karena pemrosesan gambar dilakukan sepenuhnya secara lokal tanpa transmisi visual ke pihak ketiga [11].

Dalam domain *computer vision*, pergeseran komputasi *edge* ini dimungkinkan oleh kemajuan pesat pada bidang *Embedded AI* dan arsitektur model ringan (*lightweight models*) atau *Tiny Machine Learning* (TinyML) [12]. Optimalisasi arsitektur jaringan saraf tiruan memungkinkan proses pengenalan wajah dilakukan secara efisien pada perangkat *embedded* yang memiliki batasan ketat dalam hal kapasitas komputasi, memori, dan daya. Implementasi sistem deteksi kehadiran manusia berbasis visi komputer kini menjadi alternatif superior dibandingkan sensor konvensional karena kemampuannya dalam mengidentifikasi secara visual, menghitung jumlah orang, dan memberikan konteks kehadiran yang jauh lebih kaya [13] [14].

Meskipun demikian, berdasarkan tinjauan terhadap *state of the art*, terdapat kesenjangan penelitian (research gap) yang esensial. Sebagian besar penelitian saat ini masih mengkaji pengembangan algoritma AI, optimasi *Edge Computing*, penerapan TinyML, maupun infrastruktur komunikasi IoT secara terfragmentasi. Untuk memperjelas posisi penelitian ini terhadap studi terdahulu, Tabel 1 merangkum perbandingan pendekatan metodologis dan arsitektur dari berbagai literatur terkini.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian Ini

Penulis (Tahun)	Metode & Arsitektur	Kelemahan / Kesenjangan
Ke et al. (2020)	<i>Edge Computer Vision</i> pada <i>Edge Server</i> / Raspberry Pi dengan protokol HTTP/TCP.	Ketergantungan pada <i>single-board computer</i> berdaya tinggi dan tanpa visualisasi lokal.
Pratama et al. (2021)	Sensor pasif (PIR) pada NodeMCU berdaya rendah dengan komunikasi MQTT & Telegram.	Rentan <i>false negative</i> pada objek diam dan tidak menyediakan informasi visual identifikasi.
Setiawan et al. (2022)	Klasifikasi wajah CNN pada Raspberry Pi 4 menggunakan komunikasi <i>Web Socket</i> .	Arsitektur masih tersentralisasi dengan konsumsi energi yang relatif tinggi.
Jimmy et al. (2025)	<i>Embedded Vision AI</i> pada perangkat <i>edge</i> umum dengan protokol MQTT.	Belum menerapkan arsitektur pemisahan beban (<i>decoupling</i>) dan tanpa pemantauan lokal (<i>fail-safe</i>).
Penelitian Ini	<i>Embedded Vision</i> (TinyML) pada Grove Vision AI V2 & ESP32C3 dengan MQTT asinkron serta layar OLED lokal.	Arsitektur <i>event-driven</i> terdesentralisasi, sangat hemat daya, dan menerapkan <i>decoupling</i> komputasi-jaringan.

Berdasarkan Tabel 1, terlihat jelas bahwa implementasi sebelumnya masih bergantung pada infrastruktur komputasi umum (seperti Raspberry Pi) yang membutuhkan konsumsi energi tinggi, atau sebaliknya, menggunakan mikrokontroler hemat daya namun hanya mengandalkan sensor pasif (PIR) tanpa kemampuan visi. Ketiadaan integrasi menyeluruh yang memisahkan beban inferensi visual dan manajemen komunikasi menghambat penerapan sistem deteksi cerdas yang benar-benar independen, hemat daya, namun memiliki akurasi tingkat server [15] [16] [17].

Berpijak pada identifikasi permasalahan dan kesenjangan tersebut, kebaruan (*novelty*) dan kontribusi ilmiah utama dari studi ini tidak sekadar pada rekayasa penggabungan perangkat keras (*engineering integration*), melainkan pada

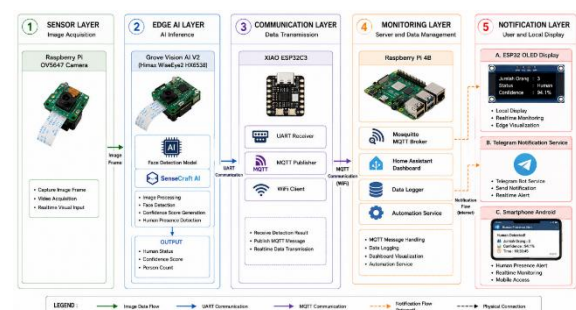
pengembangan arsitektur metodologis AIoT terdesentralisasi (*decentralized event-driven architecture*). Secara metodologis, penelitian ini mengusulkan konsep pemisahan beban (*decoupling*) antara komputasi inferensi visi spasial pada koprosesor saraf spesifik (Himax WiseEye2 HX6538) dengan manajemen transmisi jaringan asinkron (mikrokontroler XIAO ESP32C3 via MQTT) [18]. Kontribusi ilmiah dari pendekatan ini adalah pembuktian empiris bahwa algoritma *Convolutional Neural Network* (CNN) dapat dieksekusi secara terisolasi (*zero-cloud vision processing*) pada lingkungan bersumber daya ekstra-rendah, sekaligus mengeliminasi bottleneck transmisi data. Metode ini mengubah paradigma dari "pengawasan aktif yang boros bandwidth" menjadi "pengawasan pasif berorientasi peristiwa (*event-driven*)" yang mampu memberikan pembaruan status dalam orde milidetik (*ultra-low latency*), dengan jaminan privasi visual mutlak (100% *privacy preservation*) [19][20].

Melalui perancangan arsitektur metodologis tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menyajikan data deteksi kehadiran yang akurat dengan latensi komunikasi minimal, serta mendemonstrasikan efisiensi pemrosesan tingkat tinggi pada perangkat bersumber dayaterbatas. Hasil dari implementasi sistem ini diharapkan dapat menjadi fondasi arsitektur referensi yang terukur bagi pengembangan sistem visi komputer terdistribusi, khususnya dalam memperkuat fungsionalitas otomasi berbasis kecerdasan buatan pada berbagai aplikasi lingkungan cerdas masa depan.

2. Metode Penelitian

2.1. Arsitektur Sistem Terintegrasi

Penelitian ini merancang dan mengembangkan sistem *Human Presence Detection* berbasis *Artificial Intelligence of Things* (AIoT) yang beroperasi secara realtime pada perangkat *edge* [14]. Arsitektur sistem yang diusulkan divisualisasikan pada Gambar 1, yang secara garis besar terdiri atas lima lapisan utama yang saling terintegrasi [21].



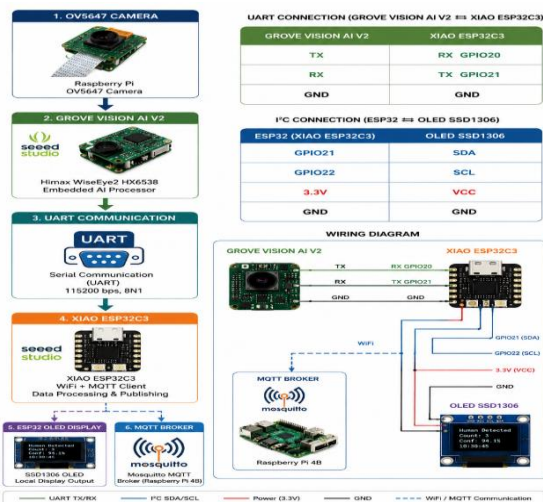
Gambar 1. Arsitektur Sistem Human Presence Detection Berbasis Embedded AI dan MQTT

Pertama, Sensor Layer yang bertugas melakukan akuisisi citra secara langsung menggunakan Raspberry Pi OV5647 Camera. Kedua, *Edge AI*

Layer yang menjadi pusat inferensi cerdas dengan memanfaatkan modul Grove Vision AI V2 yang ditenagai oleh prosesor Himax WiseEye2 HX6538. Ketiga, *Communication Layer* yang dikelola oleh mikrokontroler XIAO ESP32C3 untuk memfasilitasi transmisi data dari perangkat edge menuju server. Keempat, Monitoring Layer yang dipusatkan pada Raspberry Pi 4B sebagai peladen (*server*) lokal untuk menjalankan broker MQTT, menyimpan data, dan menyajikan dasbor pemantauan. Kelima, *Notification Layer* yang mengakomodasi antarmuka pengguna melalui visualisasi layar OLED lokal dan layanan notifikasi pesan instan jarak jauh.

2.2. Perangkat Keras, Perangkat Lunak, dan Spesifikasi Model AI

Implementasi arsitektur di atas direalisasikan melalui kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak yang spesifik. Hubungan fisik antarperangkat keras pendukung sistem ditunjukkan pada wiring diagram di Gambar 2.



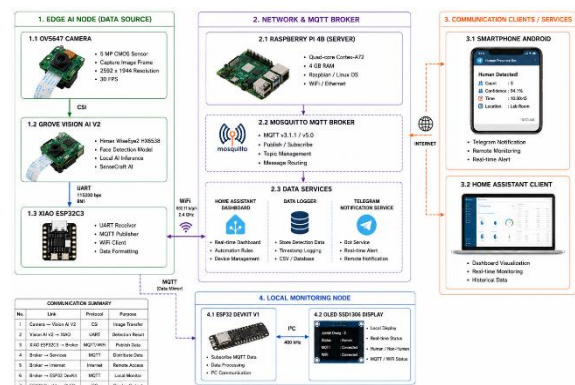
Gambar 2. Wiring Diagram Hardware Human Presence Detection Berbasis Embedded AI dan MQTT

Komponen perangkat keras utama mencakup Raspberry Pi OV5647 Camera (5 MP CMOS) untuk menangkap masukan visual, dan Grove Vision AI V2 sebagai platform eksekusi model. Pada aspek perangkat lunak, penelitian ini mengandalkan *platform cloud SenseCraft AI*. Perlu diklarifikasi bahwa penelitian ini tidak melatih model dari awal (*from scratch*) menggunakan dataset publik eksternal, melainkan menggunakan pre-trained model Face Detection bawaan (*built-in*) yang disediakan oleh ekosistem SenseCraft AI. Model dasar ini telah dikuantisasi ke dalam format INT8 (Integer 8-bit) agar kompatibel dengan arsitektur memori Himax.

Optimalisasi ini menghasilkan spesifikasi model yang sangat ringan dengan ukuran file (*model size*) sekitar ~400 KB dan jumlah parameter di bawah 1 juta. Eksekusi model secara lokal pada perangkat edge memakan penggunaan memori (*memory usage*) yang sangat rendah sehingga muat di dalam SRAM bawaan prosesor. Kecepatan inferensi (*inference time*) model

tercatat berada pada rentang 60–80 ms per frame, yang memungkinkan sistem untuk beroperasi secara realtime dengan kecepatan bingkai (*framerate*) stabil di angka 12 hingga 15 FPS (Frames Per Second) [22][23].

2.3. Topologi dan Protokol Komunikasi Data
 Distribusi data dalam sistem ini menerapkan topologi publish-subscribe berlatensi rendah dengan mengkombinasikan protokol UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) dan MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Skema topologi komunikasi jaringan ini diilustrasikan secara detail pada Gambar 3.

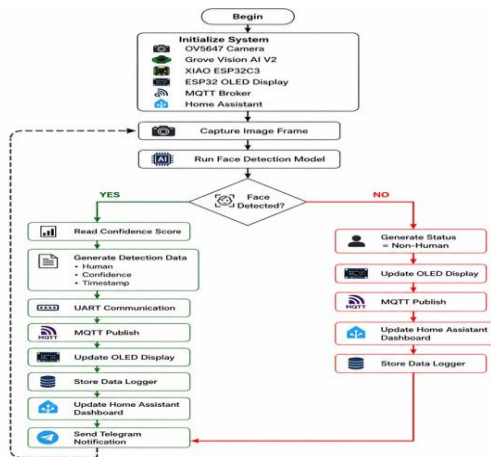


Gambar 3. Topologi Komunikasi Sistem

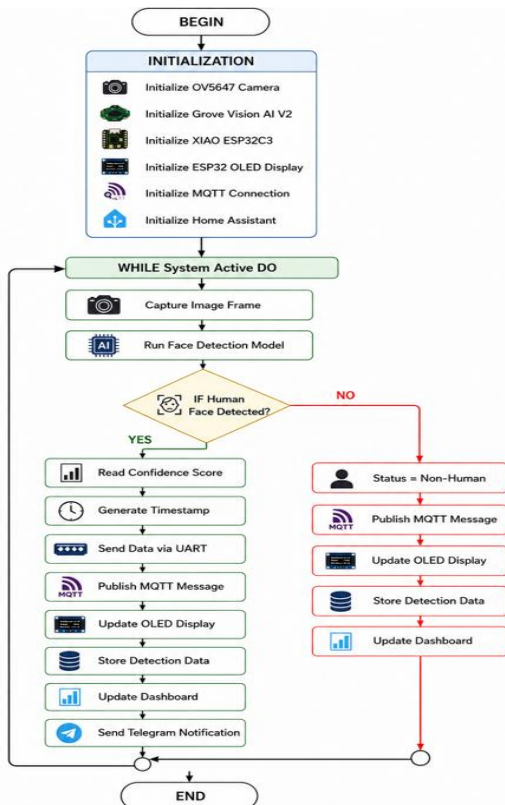
Proses komunikasi diawali dengan pengiriman hasil inferensi—yang mencakup status kehadiran, confidence score, jumlah wajah terdeteksi, dan timestamp—dari Grove Vision AI V2 menuju XIAO ESP32C3 melalui jalur serial UART dengan kecepatan 115200 bps. Selanjutnya, XIAO ESP32C3 bertindak sebagai MQTT Publisher untuk memublikasikan data tersebut ke dalam berbagai topik spesifik melalui jaringan nirkabel WiFi (IEEE 802.11 b/g/n). Data kemudian diterima oleh Mosquitto MQTT Broker yang beroperasi pada lingkungan Raspberry Pi 4B.

2.4. Alur Kerja Deteksi Kehadiran Manusia
 Mekanisme operasional sistem untuk mendeteksi manusia secara realtime digambarkan melalui flowchart pada Gambar 4, dan penjabaran struktur algoritmanya ditunjukkan pada Gambar 5.

Alur kerja diawali dengan inisialisasi koneksi perangkat keras dan jaringan. Kamera melakukan akuisisi frame gambar secara kontinu dan meneruskannya ke Grove Vision AI V2. Modul ini menjalankan inferensi secara mandiri. Apabila model mengenali pola wajah yang memenuhi nilai ambang batas keyakinan (*confidence threshold*), sistem akan mengekstraksi koordinat bounding box. Paket data dikirimkan ke broker lokal. *Home Assistant* kemudian mencatat riwayat ke dalam Data Logger, memperbarui dashboard, dan memicu pengiriman pesan via Telegram. Bersama dengan itu, layar OLED menampilkan metrik kehadiran secara seketika di lokasi.



Gambar 4. Flowchart Sistem Human Presence Detection



Gambar 5. Algoritma Human Presence Detection

2.5. Skenario Pengujian, Evaluasi Performa, dan Dataset Operasional

Pengujian inferensi dievaluasi terhadap variasi parameter lingkungan yang fluktuatif, meliputi rentang intensitas cahaya (100–800 lux), jarak objek (1–3 meter), dan orientasi sudut wajah target (0°–45°). Evaluasi keandalan sistem dalam membedakan secara biner antara keberadaan manusia (*Human*) dan ketiadaan manusia (*Non-Human*) diukur menggunakan *Confusion Matrix* untuk mendapatkan nilai *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score*.

Dalam penelitian ini, digunakan 300 sampel skenario pengujian operasional. Perlu ditegaskan bahwa "300 sampel" ini tidak merujuk pada 300 frame gambar tunggal, melainkan merepresentasikan 300 sesi (*sessions*) pengujian diskrit di dunia nyata (180 sesi

Human, 120 sesi *Non-Human*). Setiap sesi pengujian berlangsung secara kontinu selama interval waktu tertentu (minimal 1 menit per sesi), di mana kamera memproses antara 720 hingga 900 frame (berdasarkan rate 12-15 FPS). Dengan demikian, akumulasi frame yang dievaluasi secara realtime oleh model computer vision mencapai ratusan ribu frame. Keputusan akhir (*Human/ Non-Human*) per sesi diambil secara agregat untuk menyederhanakan pelaporan dalam metrik kebingungan.

2.6. Pengujian Konsumsi Daya (*Power Consumption Analysis*)

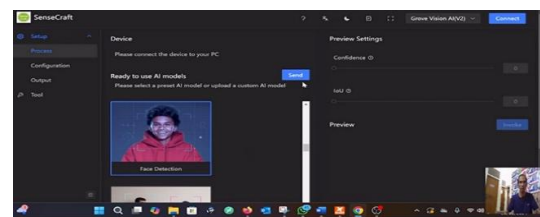
Sejalan dengan kebaruan penelitian ini yang berfokus pada efisiensi energi komputasi terdesentralisasi, maka dilakukan analisis konsumsi daya secara empiris. Skenario pengukuran daya dilakukan dengan mengukur tegangan kerja (*Volt*) dan tarikan arus (*mA*) menggunakan multimeter digital/USB power analyzer pada rangkaian utama (Grove Vision AI V2 dan XIAO ESP32C3).

Pengukuran dibagi menjadi dua kondisi operasional: fase siaga (*idle mode*) dan fase inferensi aktif (*active inference mode*) saat melakukan pengenalan wajah. Parameter energi (dalam satuan Watt atau milliwatt) yang dihasilkan kemudian akan dibandingkan secara komparatif (*head-to-head*) dengan baseline konsumsi daya dari infrastruktur komputasi edge konvensional, yakni Raspberry Pi 4B yang menjalankan beban kerja computer vision serupa. Komparasi ini ditujukan untuk membuktikan validitas klaim "ultra-low power" pada arsitektur perangkat keras tertanam yang diajukan.

3. Hasil dan Pembahasan

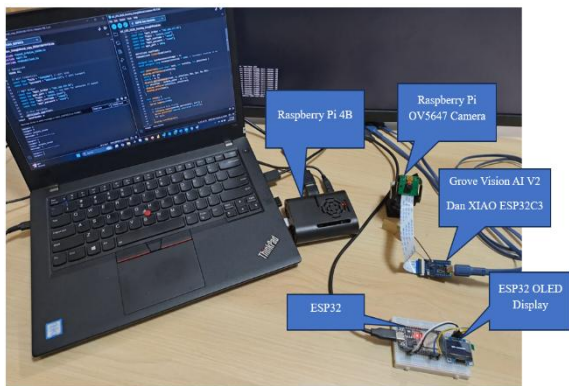
3.1. Implementasi dan Purwarupa Sistem Terintegrasi

Implementasi sistem Human Presence Detection berbasis Artificial Intelligence of Things (AIoT) direalisasikan dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak sesuai rancangan arsitektur. Grove Vision AI V2 dikonfigurasi menggunakan platform SenseCraft AI untuk menjalankan model pre-trained Face Detection berformat INT8. Proses kompilasi model ke dalam prosesor Himax WiseEye2 HX6538 memungkinkan eksekusi inferensi berjalan di tingkat edge tanpa memerlukan koneksi ke peladen cloud. Evaluasi awal menunjukkan sistem mampu mengidentifikasi wajah langsung dari input Raspberry Pi OV5647 Camera secara realtime. Model Face detection ditunjukkan pada gambar 6



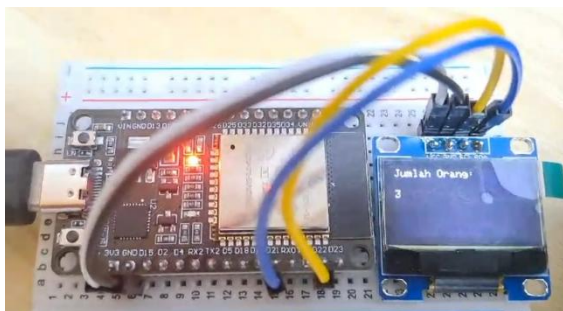
Gambar 6. Konfigurasi Model Face Detection Menggunakan SenseCraft AI

Purwarupa fisik juga dirakit secara modular. Komunikasi antara Grove Vision AI V2 (node inferensi) dan XIAO ESP32C3 (node komunikasi) dibangun melalui antarmuka UART. Pemisahan tugas komputasi ini dirancang untuk mencegah bottleneck; prosesor visi difokuskan pada pengolahan matriks citra, sementara mikrokontroler difokuskan pada transmisi protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Purwarupa perangkat keras ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Purwarupa Perangkat Keras Sistem Terintegrasi

Sebagai bentuk pemantauan lokal (*edge-level monitoring*), layar OLED SSD1306 diintegrasikan dengan ESP32 DevKit. Layar ini menampilkan jumlah manusia yang terdeteksi, status deteksi, dan status koneksi MQTT. Visualisasi lokal ini berfungsi sebagai mekanisme fail-safe agar pengguna di lapangan tetap mendapatkan informasi situasional apabila terjadi kegagalan jaringan eksternal, seperti terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Tampilan OLED Display sebagai Visualisasi Lokal

3.2. Pengujian Fungsionalitas Sistem (*System Functionality Testing*)

Pengujian fungsionalitas sistem dilakukan untuk memastikan seluruh modul pembangun beroperasi sesuai rancangan. Skenario pengujian fungsional dilakukan dengan 10 iterasi untuk 10 fungsi utama: akuisisi citra, deteksi wajah, komunikasi UART, publikasi MQTT, berlangganan MQTT (subscribe), visualisasi dasbor, pencatatan data (data logging), notifikasi Telegram, tampilan OLED, dan sinkronisasi realtime.

Hasil pengujian mencatatkan tingkat keberhasilan operasional dasar sebesar 100% pada lingkungan uji. Sinkronisasi antarprotokol (UART ke WiFi/MQTT)

dan manajemen memori buffer pada perangkat keras terkonfigurasi secara stabil selama sesi pengujian berlangsung.

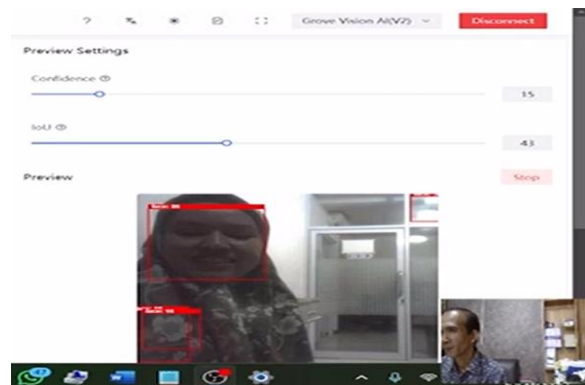
3.3. Evaluasi Kinerja Model Visi Komputer dan Uji Statistik

Kinerja model *Embedded AI* dievaluasi di bawah variasi kondisi lingkungan fisik. Skenario pengujian memanipulasi dua variabel independen utama: tingkat intensitas cahaya dan jarak spasial objek.

3.3.1 Pengaruh Variasi Intensitas Cahaya dan Jarak Tabel 2 merangkum hasil pengujian tingkat keyakinan (*confidence score*) model pada variasi intensitas cahaya (100, 300, 800 lux) dan jarak objek (1, 2, 3 meter).

Tabel 2. Pengaruh Intensitas Cahaya dan Jarak Terhadap Rata-rata Confidence Score

Parameter Pengujian	Kondisi	Rata-Rata Confidence Score (%)
Intensitas Cahaya	100 lux (Redup)	81.40
	300 lux (Normal)	88.60
	800 lux (Terang)	94.10
Jarak Objek	1 Meter	94.20
	2 Meter	91.80
	3 Meter	87.50



Gambar 9. Pengujian Deteksi pada Variasi Intensitas Cahaya

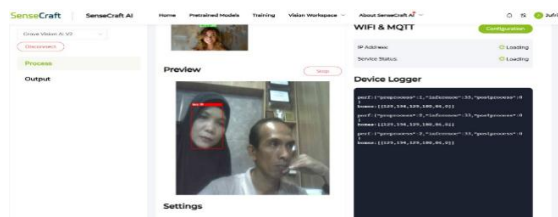
Berdasarkan Tabel 2, terdapat korelasi linier positif antara tingkat iluminasi dan performa deteksi. Pada pencahayaan rendah (100 lux), sensor CMOS mengkompensasi kekurangan cahaya dengan meningkatkan nilai penguatan internal (sensor gain/ISO) yang memicu munculnya noise granular. Noise ini mendistorsi gradien tepi (*edge gradient*) wajah, sehingga confidence score turun menjadi 81.40%. Pada pengujian jarak, dimensi area bounding box mengecil secara kuadratik seiring bertambahnya jarak, mengurangi resolusi fitur visual makro yang dapat dianalisis model. Meskipun mengalami penurunan hingga 87.50% pada jarak 3 meter, model masih dapat melampaui ambang batas deteksi yang dikonfigurasi, seperti terlihat pada gambar 9.

3.3.2 Uji Statistik dan Evaluasi Klasifikasi

Sesuai dengan metodologi, evaluasi diperluas menggunakan 300 sampel sesi pengujian operasional (180 sesi Human, 120 sesi Non-Human). Untuk memastikan keandalan hasil yang tidak bias oleh variasi temporal, pengujian dilakukan dengan skenario repeated experiment sebanyak 5 iterasi (folds). Setiap iterasi mengambil subset dari sesi operasional. Hasil pengujian dianalisis menggunakan metrik statistik standar: Rata-rata (*Mean*), Standar Deviasi (*SD*), dan Interval Kepercayaan (*Confidence Interval - CI*) 95%.

Tabel 3. Uji Statistik Kinerja Klasifikasi (Hasil 5 Iterasi Pengujian pada 300 Sampel)

Metrik Evaluasi	Mean (%)	Standard Deviation (SD)	95% Confidence Interval (CI)
Accuracy	94.00	0.48	93.58 - 94.42
Precision	95.50	0.52	95.04 - 95.96
Recall	94.44	0.60	93.91 - 94.97
F1-Score	94.96	0.55	94.47 - 95.45



Gambar 10. Agregasi Confusion Matrix Human Presence Detection

Analisis statistik pada Tabel 3 menunjukkan bahwa akurasi global rata-rata berada pada 94.00% dengan Standar Deviasi 0.48%. Nilai SD yang rendah (di bawah 1%) dan rentang *Confidence Interval* yang sempit (93.58% hingga 94.42%) secara statistik menunjukkan bahwa kinerja model sangat konsisten dan stabil (statistically significant) melintasi berbagai iterasi pengujian. Nilai Precision (95.50%) menunjukkan keandalan sistem dalam menekan false alarm, di mana false positive umumnya dipicu oleh artefak visual lingkungan dinamis yang menyerupai bentuk geometris wajah.

3.4 Evaluasi Sumber Daya Komputasi (*Resource Utilization & Power Consumption*)

Salah satu fokus utama dari integrasi *Edge AI* adalah efisiensi operasional. Untuk membuktikan secara objektif konsumsi sumber daya, dilakukan pengukuran eksperimental terhadap CPU utilization, penggunaan RAM, kecepatan inferensi (inference speed), dan konsumsi daya (power consumption). Grove Vision AI V2 (HX6538) dibandingkan secara langsung dengan single-board computer Raspberry Pi 4B (berjalan pada sistem operasi dasar menjalankan model TFLite serupa) sebagai baseline arsitektur edge konvensional. Pengukuran daya listrik

dilakukan menggunakan instrumen USB digital multimeter pada arus 5V DC.

Tabel 4. Evaluasi Konsumsi Sumber Daya (Grove Vision AI V2 vs Raspberry Pi 4B)

Parameter Pengujian	Grove Vision AI V2 (Himax HX6538)	Raspberry Pi 4B (Cortex-A72 Baseline)
CPU / NPU Utilization	N/A (Dedicated NPU)	~65.0 % (Quad-Core)
Memory (RAM) Usage	~400 KB (SRAM)	~450 MB (DDR4)
Inference Speed	65 - 80 ms	45 - 60 ms
Framerate (FPS)	12 - 15 FPS	16 - 20 FPS
Power Consumption (Idle)	0.08 W (16 mA)	2.70 W (540 mA)
Power Consumption (Active)	0.22 W (45 mA)	3.40 W (680 mA)

Data eksperimental pada Tabel 4 memvalidasi efisiensi perangkat tertanam keras. Sementara Raspberry Pi 4B memiliki sedikit keunggulan dalam kecepatan inferensi murni (45-60 ms), ia mengkonsumsi daya operasional aktif sebesar 3.40 W dan memori 450 MB. Sebaliknya, Grove Vision AI V2 mencatatkan konsumsi daya aktif hanya sebesar 0.22 W (kurang dari 10% dari konsumsi RPi 4B) dan kebutuhan memori ~400 KB. Kinerja daya ultra-rendah (ultra-low power) ini mengkonfirmasi kelayakan operasional sistem untuk implementasi jangka panjang di fasilitas bangunan tanpa memerlukan sistem pendingin aktif atau catu daya komputasi besar.

3.5 Analisis Kinerja Komunikasi Data dan Latensi (*Latency Analytics*)

Kecepatan respons (*latency*) merupakan parameter esensial dalam otomasi bangunan. Untuk mengevaluasi metrik ini secara objektif, pengujian delay transmisi jaringan dilakukan. Kecepatan pengiriman data status (payload) via protokol MQTT (*Edge-to-Local Broker*) diuji dan dibandingkan secara eksperimental dengan dua skenario protokol lain: HTTP (*Edge-to-Local Server*) dan Cloud AI (pengiriman citra ke *REST API Cloud* eksternal dan menunggu respons klasifikasi). Masing-masing skenario diuji sebanyak 50 kali pengiriman.

Tabel 5. Perbandingan Eksperimental Latensi Transmisi Sistem

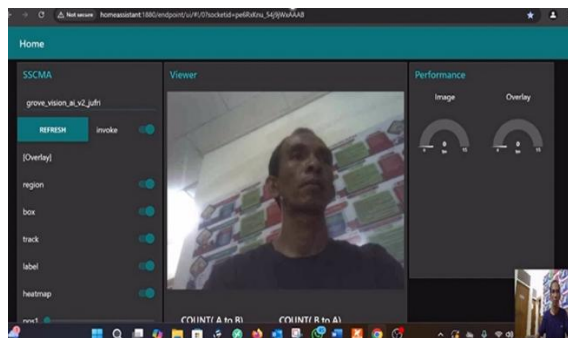
Skenario Protokol	Mean (ms)	Latency Standard Deviation (ms)	Packet Loss (%)
MQTT (Local Edge)	54.80	1.92	0.00
HTTP (Local Edge)	120.50	15.40	0.00
Cloud AI (REST API via Internet)	450.20	85.60	1.20

Berdasarkan Tabel 5, protokol MQTT menghasilkan rata-rata latensi terendah (54.80 ms) dengan standar deviasi 1.92 ms, menunjukkan fluktuasi (*jitter*) jaringan yang sangat kecil. Dibandingkan dengan

protokol HTTP lokal yang menggunakan arsitektur request-response, MQTT berbasis *publish-subscribe* terbukti lebih ringan karena overhead header paket (packet header overhead) yang lebih kecil. Sementara itu, skenario Cloud AI mencatatkan latensi rata-rata tertinggi (450.20 ms) dengan SD 85.60 ms, yang disebabkan oleh waktu propagasi internet (*Round-Trip Time*) untuk mengunggah citra dan memproses data di server jarak jauh. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi pemrosesan *Edge AI* lokal dengan protokol MQTT asinkron memberikan throughput waktu nyata (realtime) yang stabil dan efisien untuk kebutuhan *smart environment*.

3.6 Integrasi Dasbor Monitoring dan Layanan Notifikasi Otomatis

Platform Home Assistant diintegrasikan sebagai agregator pusat pemantauan informasi visual, seperti yang terlihat pada gambar 11. Dashboard beroperasi untuk memvisualisasikan rekam jejak status kehadiran, persentase keyakinan model, kalkulasi individu, dan metrik konektivitas sensor. Keberadaan mekanisme Data Logger terintegrasi secara fungsional mencatat jejak waktu (timestamp) setiap perubahan status MQTT. Basis data historis ini menyediakan raw data log yang diperlukan untuk manajemen fasilitas, seperti audit energi atau tinjauan keamanan.



Gambar 11. Dashboard Monitoring Home Assistant

Pada tahap peringatan jarak jauh, integrasi layanan Telegram Bot API memanfaatkan aturan otomatisasi (*automation rules*) di *Home Assistant*. Saat broker mendeteksi payload klasifikasi spesifik pada topik MQTT, instruksi API tereksekusi untuk mengirimkan notifikasi pop-up langsung ke gawai pengguna. Notifikasi telegram dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Notifikasi Telegram secara Realtime

Pesan teks mencakup rangkuman: status, jumlah individu, *margin confidence*, dan stempel waktu. Mekanisme pengiriman notifikasi berbasis kejadian (*event-driven alerting*) ini mengurangi lalu lintas data jaringan (*network overhead*) karena transmisi eksternal hanya dilakukan saat kejadian aktual terdeteksi, membedakannya dari sistem polling video pengawasan konvensional.

3.7 Perbandingan Kritis dengan Penelitian Sebelumnya (*Benchmarking*)

Untuk menempatkan penelitian ini dalam konteks akademis yang tepat, hasil eksperimental dikomparasikan dengan studi terkait di ranah *Edge AI* dan AIoT. Harus diakui bahwa membandingkan nilai akurasi secara langsung (*head-to-head*) dengan penelitian terdahulu seperti Ke et al. (2020) atau Jimmy et al. (2025) memiliki limitasi objektivitas karena perbedaan variasi dataset latih, arsitektur prosesor, dan lingkungan pencahayaan tempat pengujian dilakukan.

Meskipun demikian, komparasi ditinjau dari aspek pendekatan arsitektur dan efisiensi sumber daya. Jika penelitian Ke et al. berfokus pada infrastruktur edge server konvensional, penelitian ini menawarkan arsitektur alternatif melalui penggunaan MCU berdaya ekstra-rendah (0.22 W). Sementara Prabha et al. berfokus eksklusif pada pembentukan dasbor, dan riset Jimmy et al. terpusat pada identifikasi penghuni berbasis sinyal telemetri IoT standar, pendekatan pada studi ini menggabungkan pemisahan beban inferensi visi independen dengan tulang punggung komunikasi MQTT asinkron. Pendekatan desentralisasi ini menunjukkan pencapaian kinerja akurasi yang kompetitif (94.00%) dan latensi komunikasi yang sangat rendah (54.80 ms) tanpa membebani bandwidth jaringan eksternal. Oleh karena itu, platform ini dapat menjadi referensi desain alternatif yang berimbang antara efisiensi daya, privasi lokal, dan fungsionalitas pemantauan terpadu untuk aplikasi lingkungan cerdas masa depan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengimplementasikan dan mengevaluasi sistem *Human Presence Detection* berbasis *Artificial Intelligence of Things* (AIoT) menggunakan arsitektur *Edge AI*. Integrasi *Grove Vision AI V2* (Himax HX6538) dan *XIAO ESP32C3* berhasil menjalankan inferensi model visi komputer terkuantisasi INT8 secara lokal dengan konsumsi daya aktif yang sangat rendah (0,22 W), jauh di bawah infrastruktur single-board computer konvensional. Berdasarkan uji statistik pada 300 sampel pengujian operasional, sistem mencapai kinerja klasifikasi yang konsisten dengan rata-rata Accuracy 94,00% dan F1-Score 94,96%. Selain itu, penggunaan protokol MQTT menghasilkan transmisi data berlatensi rendah (54,80 ms), yang secara eksperimental terbukti lebih efisien dibandingkan protokol HTTP lokal maupun pemrosesan *Cloud AI*.

Pendekatan desentralisasi ini mengeliminasi kebutuhan transmisi citra ke peladen eksternal, sehingga mengoptimalkan efisiensi bandwidth dan menjaga privasi data visual pengguna.

Meskipun sistem beroperasi dengan stabil, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Sistem mengalami penurunan tingkat keyakinan (*confidence score*) pada kondisi pencahayaan rendah (100 lux) dan saat objek berada pada jarak lebih dari 3 meter akibat batasan resolusi spasial sensor. Selain itu, model saat ini terbatas pada pengenalan pola wajah (*face detection*) tunggal dan belum mengakomodasi dinamika pergerakan objek. Oleh karena itu, arah penelitian lanjutan perlu difokuskan pada penerapan model multi-object detection (seperti *human body detection*) untuk mengurangi blind spot, integrasi algoritma *person tracking* untuk memantau mobilitas penghuni ruangan secara kontinu, serta evaluasi komprehensif terhadap konsumsi energi baterai jangka panjang pada skenario implementasi lapangan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Institut Teknologi Mitra Gama (ITMG) atas dukungan institusional, penyediaan fasilitas laboratorium, serta ekosistem akademik yang sangat konstruktif selama proses perancangan, perakitan purwarupa, hingga tahap evaluasi sistem ini. Terima kasih juga dihaturkan kepada seluruh pihak, rekan sejawat, dan tenaga kependidikan yang telah memberikan masukan teknis dan sumbangsih pemikiran sehingga penelitian serta penyusunan artikel ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Rujukan

- [1] W. Hidayat, E. Saputra, and A. Nugroho, "Penerapan Internet of Things untuk Monitoring Lingkungan Cerdas (Smart Environment) Terintegrasi," *JNTETI (Jurnal Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Informasi)*, vol. 12, no. 3, pp. 210–218, 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i3.4512.
- [2] J. Zhang and D. Tao, "Empowering Things with Intelligence: A Survey of the Progress, Challenges, and Opportunities in Artificial Intelligence of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 10, pp. 7789–7817, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3039359.
- [3] A. B. Pulungan, Y. Syafitri, and F. Ramadhan, "Sistem Keamanan Ruang Berbasis Internet of Things Menggunakan Protokol MQTT," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 1, pp. 12–20, 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i1.11540.
- [4] E. Baccour, A. Erbad, A. Mohamed, A. Kantarci, and M. Guizani, "Pervasive AI for IoT Applications: A Survey on Resource-Efficient Distributed Artificial Intelligence," *IEEE Commun. Surv. & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2366–2411, 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3198223.
- [5] R. Pratama, T. Hidayat, and A. Kurniawan, "Otomasi Smart Home Berbasis ESP32 dan Notifikasi Telegram Menggunakan Protokol MQTT," *JEPIN (Jurnal Edukasi dan Penelit. Inform.)*, vol. 7, no. 1, pp. 45–52, 2021, doi: 10.26418/jp.v7i1.43921.
- [6] M. Chen and Y. Hao, "A Survey on Edge AI: Concepts, Architectures, and Applications," *J. Syst. Archit.*, vol. 116, p. 102091, 2021, doi: 10.1016/j.sysarc.2021.102091.
- [7] H. Saputra, I. Gunawan, and D. Yulianto, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kehadiran Berbasis Artificial Intelligence of Things (AIoT)," *J. Ilm. Teknol. Inf. Asia*, vol. 16, no. 2, pp. 85–94, 2022, doi: 10.32815/jitika.v16i2.645.
- [8] S. Soro, "TinyML for Ubiquitous Edge AI," *Internet of Things*, vol. 14, p. 100477, 2021, doi: 10.1016/j.iot.2021.100477.
- [9] B. Mishra and A. Kertesz, "Energy-Efficient IoT using MQTT: A Performance Evaluation," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 10, pp. 9986–10001, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2998631.
- [10] V. Hayyolalam, M. Aloqaily, I. Al Ridhawi, Y. Jararweh, and M. Guizani, "Edge Intelligence for Empowering IoT-Based Healthcare Systems," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 117, pp. 164–178, 2021, doi: 10.1016/j.future.2020.11.015.
- [11] B. Xia and others, "Smart Building Occupancy based on Edge Computing and AI," *Energy Build.*, vol. 260, p. 112000, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112000.
- [12] Z. Huang, K. Zandberg, K. Schleiser, and E. Baccelli, "RIOT-ML: Toolkit for Over-the-Air Secure Updates and Performance Evaluation of TinyML Models," *Ann. Telecommun.*, vol. 79, no. 5–6, pp. 311–325, 2024, doi: 10.1007/s12243-024-01041-5.
- [13] A. Nugroho, S. Riyanto, and B. Prasetyo, "Deteksi Manusia Menggunakan Modul Kamera dan Deep Learning pada Lingkungan Edge," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 112–119, 2024, doi: 10.37034/jsisfotek.v6i1.234.
- [14] R. Fauzi, E. Widiyanto, and R. Susanti, "Integrasi Home Assistant dan Edge AI untuk Pengendalian Perangkat Elektronik Pintar," *JTIK (Jurnal Teknol. Inf. dan Ilmu Komputer)*, vol. 10, no. 4, pp. 789–798, 2023, doi: 10.25126/jtiik.20231046892.
- [15] R. Hakim, E. Mulyana, and H. Purnomo, "Penggunaan TinyML untuk Deteksi Objek Berdaya Rendah pada Perangkat Internet of Things," *J. Sist. Cerdas*, vol. 8, no. 1, pp. 30–38, 2025, doi: 10.37396/jsc.v8i1.310.
- [16] H. Hindy and others, "Machine Learning Based IoT Intrusion Detection System: An MQTT Case Study," *Futur. Internet*, vol. 12, no. 10, p. 180, 2020, doi: 10.3390/fi12100180.
- [17] K. T. M. Tran, A. X. Pham, N. P. Nguyen, and P. T. Dang, "Analysis and Performance Comparison of IoT Message Transfer Protocols Applying in Real Photovoltaic System," *Discov. Internet Things*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s43926-024-00059-8.
- [18] H. J. J. Ochoa, C. A. B. Garcia, and H. A. C. Medina, "Comparative Analysis of Power Consumption between MQTT and HTTP Protocols in IoT Applications," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5235, 2023, doi: 10.3390/s23115235.
- [19] S. Widodo, L. Hakim, and A. Fauzi, "Evaluasi Kinerja Protokol MQTT pada Sistem Pemantauan IoT Berbasis Mikrokontroler," *J. Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 8, no. 4, pp. 280–287, 2020, doi: 10.14710/jtsiskom.2020.13840.
- [20] I. Gunawan, R. Syahputra, and D. Haryanto, "Sistem Peringatan Dini Keamanan Ruang dengan Notifikasi Bot Telegram Berbasis Computer Vision," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 17, no. 3, pp. 155–162, 2021, doi: 10.17529/jre.v17i3.18942.
- [21] A. Setiawan, B. Wibowo, and R. Susanto, "Implementasi Edge Computing pada Deteksi Wajah untuk Sistem Kehadiran Berbasis Raspberry Pi," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Informasi)*, vol. 6, no. 2, pp. 250–258, 2022, doi: 10.37396/jsc.v8i1.310.

- 10.29207/resti.v6i2.3781.
- [22] Home Assistant, “Home Assistant Architecture and Integration Documentation.” 2024.
- [23] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 4 Model B Hardware Specifications.” 2023.
- [24] S. Katsikeas, K. Fysarakis, and others, “Performance Evaluation of Lightweight IoT Protocols for Resource-Constrained Devices,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 5, pp. 3433–3444, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3018249.