



Integrasi ESP32-CAM WROVER dan Radar LD2410C untuk Klasifikasi Manusia dan Hewan Berbasis Edge Impulse

Shalma Zopi Habibah

Politeknik Negeri Padang

Yulindon

Politeknik Negeri Padang

Penulis Korespondensi: SHALMA ZOPI HABIBAH

Abstract. *This study aims to design and implement a human and animal classification system based on ESP32-CAM WROVER and LD2410C radar sensor, supported by Edge Impulse and integrated with the Telegram Bot API. The system operates in real-time, utilizing image data from the camera and presence data from the radar to improve classification accuracy. Data collection was conducted directly at the testing site to ensure the model adapts to real environmental conditions. The implementation results show that the integration of camera and radar successfully overcomes the limitations of camera-only systems, particularly under low-light conditions. Furthermore, the use of Telegram as a communication medium provides practical remote monitoring without additional applications. This system demonstrates strong potential for applications in smart homes, security, and wildlife monitoring with low cost and high flexibility.*

Keywords: *ESP32-CAM WROVER, LD2410C Radar, Edge Impulse, Human and Animal Classification, IoT*

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem klasifikasi manusia dan hewan berbasis ESP32-CAM WROVER dan sensor radar LD2410C dengan dukungan Edge Impulse serta integrasi Telegram Bot API. Sistem ini bekerja secara real-time dengan memanfaatkan data citra dari kamera dan data keberadaan dari radar untuk meningkatkan akurasi klasifikasi. Pengambilan data dilakukan langsung di lokasi pengujian agar model dapat beradaptasi dengan kondisi nyata. Hasil implementasi menunjukkan bahwa integrasi kamera dan radar mampu mengatasi keterbatasan sistem berbasis kamera tunggal, terutama pada kondisi pencahayaan rendah. Selain itu, penggunaan Telegram sebagai media komunikasi memberikan kemudahan monitoring jarak jauh tanpa aplikasi tambahan. Sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan pada aplikasi smart home, keamanan, dan monitoring satwa dengan biaya rendah dan fleksibilitas tinggi.

Kata kunci: ESP32-CAM WROVER, Radar LD2410C, Edge Impulse, Klasifikasi Manusia dan Hewan, IoT

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan komputasi tepi telah mendorong pemanfaatan perangkat berdaya rendah untuk mendukung berbagai aplikasi cerdas yang memerlukan pemrosesan data secara waktu nyata. Komputasi tepi memungkinkan proses pengolahan data dilakukan lebih dekat dengan sumber data sehingga dapat mengurangi latensi dan meningkatkan efisiensi sistem

dibandingkan pemrosesan yang sepenuhnya bergantung pada komputasi awan (Chang et al., 2025).

Salah satu penerapan teknologi tersebut adalah sistem klasifikasi manusia dan hewan untuk mendukung keamanan, pemantauan lingkungan, pengawasan satwa, dan rumah pintar. Kemampuan sistem dalam mengenali objek secara otomatis dapat meningkatkan efektivitas pemantauan serta mengurangi ketergantungan terhadap pengamatan manual. Seiring perkembangan teknologi pembelajaran mesin pada perangkat tertanam, proses klasifikasi objek kini dapat dilakukan langsung pada perangkat berukuran kecil dengan sumber daya yang terbatas (Hymel et al., 2023).

ESP32-CAM WROVER merupakan salah satu modul yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem klasifikasi objek karena memiliki kamera terintegrasi, konektivitas Wi-Fi, serta kemampuan pemrosesan yang cukup untuk menjalankan model pembelajaran mesin ringan. Platform Edge Impulse menyediakan lingkungan pengembangan yang memungkinkan proses pengumpulan data, pelatihan model, hingga implementasi model dilakukan secara terintegrasi pada perangkat tertanam (Hymel et al., 2023). Penelitian yang dilakukan oleh (Firdaus et al., 2025) menunjukkan bahwa ESP32-CAM dapat digunakan untuk menjalankan model deteksi objek berbasis Edge Impulse dengan performa yang cukup baik pada perangkat dengan sumber daya terbatas.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih mengandalkan kamera sebagai satu-satunya sensor utama. Pendekatan tersebut memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada kondisi pencahayaan rendah, objek yang terhalang, maupun perubahan sudut pandang kamera. Akibatnya, akurasi deteksi dapat menurun ketika kondisi lingkungan tidak mendukung proses pengambilan citra secara optimal.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah mengombinasikan sensor visual dengan sensor radar. Sensor radar LD2410C merupakan sensor kehadiran berbasis gelombang mikro 24 GHz yang mampu mendeteksi keberadaan manusia maupun objek bergerak dan diam berdasarkan pantulan gelombang elektromagnetik. Sensor

ini tidak bergantung pada kondisi pencahayaan sehingga dapat beroperasi pada lingkungan gelap maupun kondisi visual yang kurang baik.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan integrasi ESP32-CAM WROVER dengan sensor radar LD2410C berbasis Edge Impulse untuk melakukan klasifikasi manusia dan hewan. Kombinasi data visual dari kamera dan data kehadiran dari radar diharapkan mampu meningkatkan keandalan sistem dibandingkan penggunaan kamera saja. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem deteksi cerdas berbasis komputasi tepi yang mampu bekerja secara waktu nyata dengan tingkat akurasi yang lebih baik pada berbagai kondisi lingkungan.

2. KAJIAN TEORITIS

A. Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang memungkinkan berbagai perangkat fisik terhubung melalui jaringan internet untuk mengumpulkan, mengirimkan, dan bertukar data secara otomatis. Teknologi ini mengintegrasikan sensor, aktuator, perangkat pemrosesan, dan media komunikasi sehingga mampu menciptakan sistem yang dapat melakukan pemantauan dan pengendalian secara jarak jauh. Menurut (Kumar et al., 2019), perkembangan IoT telah memberikan dampak yang signifikan pada berbagai sektor, seperti industri, kesehatan, pertanian, transportasi, keamanan, dan rumah pintar.

Secara umum, sistem IoT terdiri atas perangkat penginderaan, jaringan komunikasi, dan aplikasi yang berfungsi mengolah serta menampilkan informasi kepada pengguna. Data yang diperoleh dari sensor dikirimkan melalui jaringan komunikasi untuk diproses sehingga menghasilkan informasi yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan secara otomatis. (Lombardi et al., 2021) menjelaskan bahwa arsitektur IoT umumnya terdiri atas lapisan persepsi (*perception layer*), lapisan jaringan (*network layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*) yang saling terintegrasi untuk mendukung pertukaran data secara efisien.

Perkembangan IoT saat ini juga didukung oleh integrasi teknologi kecerdasan buatan dan komputasi tepi. Pendekatan tersebut memungkinkan proses pengolahan data dilakukan lebih dekat dengan sumber data sehingga dapat mengurangi latensi, meningkatkan efisiensi penggunaan jaringan, serta mempercepat respons sistem. (Alfonso et al., 2021) menyatakan bahwa penerapan arsitektur IoT modern semakin mengarah pada sistem yang adaptif dan mampu mendukung kebutuhan aplikasi cerdas secara waktu nyata. Selain itu, (Choudhary, 2024) menjelaskan bahwa kombinasi IoT dengan komputasi tepi dan kecerdasan buatan menjadi salah satu arah pengembangan utama dalam implementasi sistem cerdas berbasis perangkat tertanam.

Dalam penelitian ini, konsep IoT diterapkan melalui integrasi ESP32-CAM WROVER dan sensor radar LD2410C untuk memperoleh data visual dan data keberadaan objek. Data yang diperoleh kemudian diproses menggunakan model pembelajaran mesin berbasis Edge Impulse sehingga sistem mampu melakukan klasifikasi manusia dan hewan secara otomatis. Dengan memanfaatkan konsep IoT, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan kemampuan pemantauan dan deteksi yang lebih efisien pada berbagai kondisi lingkungan.

B. Edge Impulse

Edge Impulse merupakan platform *Machine Learning Operations* (MLOps) berbasis komputasi awan yang dirancang untuk mempermudah pengembangan sistem kecerdasan buatan pada perangkat tertanam dan perangkat komputasi tepi. Platform ini menyediakan lingkungan terpadu yang mendukung proses pengumpulan data, pelabelan data, pelatihan model, evaluasi kinerja, hingga implementasi model pada berbagai perangkat keras berdaya rendah. Kehadiran Edge Impulse membantu mengatasi kompleksitas pengembangan TinyML yang umumnya melibatkan berbagai perangkat lunak dan perangkat keras yang berbeda-beda (Hymel et al., 2023).

Salah satu keunggulan Edge Impulse adalah kemampuannya menghasilkan model pembelajaran mesin yang ringan dan dioptimasi untuk perangkat dengan sumber daya terbatas. Platform ini mendukung berbagai jenis data, seperti citra, audio, getaran, dan

data sensor lainnya. Selain itu, Edge Impulse menyediakan fitur optimasi model sehingga proses inferensi dapat dijalankan secara lokal pada perangkat tanpa memerlukan koneksi ke peladen komputasi awan secara terus-menerus. Pendekatan ini mampu mengurangi latensi, meningkatkan privasi data, dan menghemat penggunaan bandwidth jaringan.

Dalam penelitian ini, Edge Impulse digunakan untuk membangun model klasifikasi manusia dan hewan berdasarkan data citra yang diperoleh dari ESP32-CAM WROVER. Setelah proses pelatihan selesai, model yang dihasilkan diimplementasikan langsung pada perangkat sehingga proses klasifikasi dapat dilakukan secara waktu nyata. Pemanfaatan Edge Impulse pada penelitian ini mendukung penerapan konsep TinyML dan komputasi tepi pada sistem klasifikasi berbasis perangkat berdaya rendah.

C. ESP32-CAM WROVER

ESP32-CAM WROVER merupakan modul mikrokontroler berbasis ESP32 yang mengintegrasikan kemampuan pemrosesan data, komunikasi nirkabel, dan akuisisi citra dalam satu perangkat. Modul ini banyak dimanfaatkan dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT), visi komputer, serta aplikasi kecerdasan buatan pada perangkat berdaya rendah karena memiliki ukuran yang ringkas, konsumsi daya yang relatif rendah, dan biaya implementasi yang terjangkau. ESP32-WROVER dilengkapi prosesor dual-core Xtensa LX6 dengan frekuensi hingga 240 MHz, memori Flash sebesar 4 MB, serta PSRAM hingga 8 MB yang mendukung pengolahan data berukuran besar, termasuk data citra dan model pembelajaran mesin.

Keunggulan utama ESP32-CAM WROVER terletak pada kemampuannya mengintegrasikan kamera OV2640 dengan fitur komunikasi Wi-Fi dan Bluetooth. Integrasi tersebut memungkinkan perangkat melakukan pengambilan citra, pemrosesan data, dan pengiriman informasi secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan. Kamera OV2640 yang digunakan pada ESP32-CAM mampu menghasilkan citra digital dengan resolusi hingga 1600×1200 piksel sehingga cukup memadai untuk berbagai aplikasi pengenalan dan klasifikasi objek (AI-Thinker, 2017).

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan pada perangkat tertanam turut meningkatkan pemanfaatan ESP32-CAM dalam berbagai penelitian. (Nowroz et al., 2025) menyatakan bahwa ESP32-CAM memiliki performa yang memadai untuk mendukung aplikasi visi komputer, seperti streaming video, deteksi objek, dan pengolahan citra pada lingkungan komputasi terbatas. Hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa perangkat ini mampu mempertahankan kinerja yang stabil meskipun memiliki keterbatasan sumber daya dibandingkan komputer atau perangkat komputasi berdaya tinggi.

Kemampuan ESP32-CAM dalam mendeteksi dan mengenali objek juga telah dibuktikan dalam berbagai penelitian. (Herwandi et al., 2025) menunjukkan bahwa ESP32-CAM dapat digunakan sebagai perangkat deteksi objek dengan tingkat performa yang cukup baik pada berbagai kondisi pengujian. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi antara kamera dan kemampuan pemrosesan yang dimiliki ESP32-CAM memungkinkan implementasi sistem pengenalan objek secara langsung pada perangkat tanpa memerlukan pemrosesan eksternal yang kompleks.

Selain digunakan untuk deteksi objek, ESP32-CAM juga telah diimplementasikan pada sistem berbasis TinyML dan komputasi tepi. (Firdaus et al., 2025) membandingkan algoritma YOLO dan FOMO pada perangkat ESP32-CAM dan menemukan bahwa model yang telah dioptimalkan dapat dijalankan secara efektif pada perangkat dengan sumber daya terbatas.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, ESP32-CAM WROVER dipilih sebagai perangkat utama dalam penelitian ini karena mampu menggabungkan fungsi akuisisi citra, komunikasi data, dan pemrosesan model kecerdasan buatan pada satu platform. Keberadaan memori PSRAM yang lebih besar dibandingkan beberapa varian ESP32 lainnya menjadi salah satu alasan pemilihan modul ini karena dapat mendukung proses inferensi model Edge Impulse secara lebih optimal.

D. Sensor Radar LD2410C

Sensor radar LD2410C merupakan sensor pendeteksi keberadaan berbasis gelombang milimeter (*millimeter wave radar*) yang bekerja pada frekuensi 24 GHz. Sensor ini

memanfaatkan pantulan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi keberadaan, pergerakan, dan posisi objek di area pemantauan. Berbeda dengan *Passive Infrared Sensor* (PIR) yang bergantung pada perubahan radiasi panas, LD2410C mampu beroperasi dengan baik pada kondisi terang maupun gelap sehingga lebih stabil terhadap perubahan lingkungan (Hi-Link, 2024).

LD2410C menggunakan teknologi *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) yang memungkinkan sensor mendeteksi keberadaan objek sekaligus memperkirakan jaraknya berdasarkan analisis sinyal pantulan yang diterima. Menurut Hi-Link (2024), teknologi ini memberikan kemampuan deteksi yang cukup akurat serta mendukung pemantauan objek yang bergerak maupun diam. Selain itu, sensor radar gelombang milimeter memiliki sensitivitas yang lebih baik dibandingkan sensor inframerah dalam mendeteksi keberadaan manusia karena tidak dipengaruhi oleh perubahan suhu lingkungan.

Dalam penelitian ini, sensor radar LD2410C diintegrasikan dengan ESP32-CAM WROVER untuk mendukung proses klasifikasi manusia dan hewan berbasis Edge Impulse. Data keberadaan dan jarak yang diperoleh dari radar digunakan sebagai informasi tambahan untuk melengkapi data citra yang dihasilkan kamera

E. Machine Learning dan TinyML

Machine Learning merupakan cabang dari kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) yang memungkinkan komputer mempelajari pola dari data untuk menghasilkan keputusan atau prediksi secara otomatis. Model *Machine Learning* dibangun melalui proses pelatihan menggunakan data yang telah disiapkan sehingga sistem dapat mengenali karakteristik tertentu dan menggunakannya untuk mengklasifikasikan data baru. Dalam bidang pengolahan citra, teknologi ini banyak diterapkan untuk mengenali objek, mendeteksi pola visual, dan melakukan klasifikasi berdasarkan informasi yang diperoleh dari gambar.

Perkembangan teknologi perangkat tertanam mendorong munculnya konsep *Tiny Machine Learning* (*TinyML*), yaitu implementasi model *Machine Learning* pada perangkat dengan kapasitas memori, daya komputasi, dan konsumsi energi yang

terbatas. (Warden & Situnayake, 2019) menjelaskan bahwa TinyML memungkinkan proses inferensi dilakukan secara langsung pada mikrokontroler tanpa harus bergantung pada layanan komputasi awan. Pendekatan tersebut memberikan beberapa keuntungan, seperti mengurangi latensi, meningkatkan efisiensi penggunaan jaringan, serta menjaga privasi data karena seluruh proses pengolahan dilakukan pada perangkat lokal.

Pada penelitian ini, konsep *Machine Learning* dan TinyML diterapkan melalui platform Edge Impulse untuk membangun model klasifikasi manusia dan hewan yang kemudian diimplementasikan pada ESP32-CAM WROVER. Setelah model selesai dilatih menggunakan dataset yang telah disiapkan, model tersebut dioptimalkan agar dapat dijalankan pada perangkat dengan sumber daya terbatas. Menurut (Banbury et al., 2021), optimasi model merupakan tahapan penting dalam implementasi TinyML karena berpengaruh terhadap kecepatan inferensi dan penggunaan memori perangkat. Dengan memanfaatkan pendekatan tersebut, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu melakukan klasifikasi manusia dan hewan secara *real-time* dengan penggunaan sumber daya yang efisien.

F. Klasifikasi Manusia dan Hewan

Klasifikasi manusia dan hewan merupakan salah satu penerapan *computer vision* yang bertujuan untuk mengidentifikasi kategori objek berdasarkan karakteristik visual yang terdapat pada citra. Proses ini dilakukan dengan memanfaatkan model *Machine Learning* yang telah dilatih menggunakan dataset berisi berbagai contoh objek sehingga sistem dapat mengenali pola tertentu dan mengelompokkan objek ke dalam kelas yang sesuai. (Putri et al., 2025) menunjukkan bahwa kombinasi ESP32-CAM dan Edge Impulse mampu digunakan untuk mengenali objek kucing secara otomatis dengan tingkat akurasi mencapai 93,33%, sehingga membuktikan bahwa perangkat berdaya rendah dapat dimanfaatkan untuk aplikasi klasifikasi objek secara *real-time*.

Perkembangan teknologi *edge AI* memungkinkan proses klasifikasi tidak lagi bergantung pada server eksternal. (Kurniawan et al., 2025) berhasil mengimplementasikan deteksi objek menggunakan ESP32-CAM dan Edge Impulse

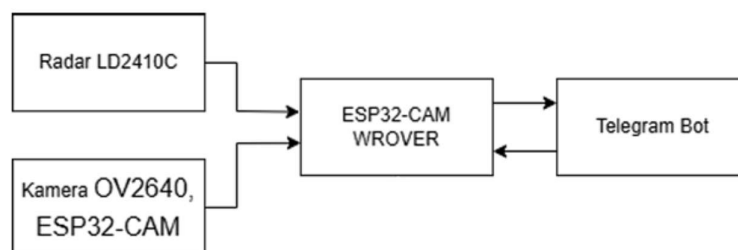
pada lingkungan industri dengan tingkat akurasi lebih dari 90% pada kondisi pengujian tertentu. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model yang telah dioptimalkan dapat dijalankan langsung pada perangkat dengan sumber daya terbatas tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam mengenali objek yang diamati.

Dalam penelitian ini, klasifikasi manusia dan hewan dilakukan menggunakan model yang dikembangkan melalui Edge Impulse dan dijalankan pada ESP32-CAM WROVER. Data citra yang diperoleh dari kamera digunakan sebagai sumber utama dalam proses klasifikasi, sedangkan sensor radar LD2410C berfungsi sebagai sumber informasi tambahan untuk mendukung deteksi keberadaan objek. Integrasi kedua sensor tersebut diharapkan mampu meningkatkan keandalan sistem dalam membedakan manusia dan hewan, terutama pada kondisi lingkungan yang kurang mendukung pengambilan citra secara optimal.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*) yang bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem klasifikasi manusia dan hewan berbasis *edge AI*. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan ESP32-CAM WROVER sebagai perangkat akuisisi citra dan sensor radar LD2410C sebagai sensor pendukung untuk mendeteksi keberadaan objek. Model klasifikasi dibangun menggunakan platform Edge Impulse dan diimplementasikan secara langsung pada perangkat sehingga proses inferensi dapat dilakukan secara *real-time*.

A. Perancangan Blok Diagram

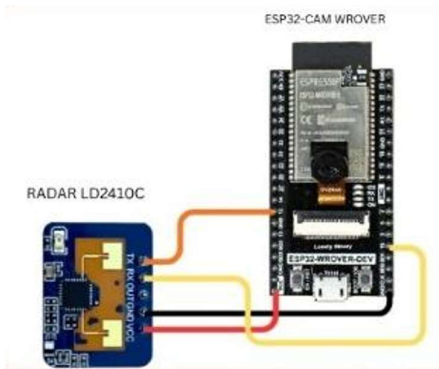


Gambar 3.1 Blok Diagram

Berdasarkan diagram blok sistem yang dirancang, penelitian ini mengintegrasikan radar LD2410C, ESP32-CAM WROVER, dan Telegram Bot untuk melakukan deteksi serta klasifikasi manusia dan hewan secara *real-time*. Proses dimulai ketika radar LD2410C mendeteksi keberadaan objek pada area pemantauan, kemudian informasi deteksi tersebut dikirimkan ke ESP32-CAM WROVER sebagai pemicu pengambilan citra. Selanjutnya, kamera OV2640 yang terintegrasi pada ESP32-CAM WROVER menangkap gambar objek dan memprosesnya menggunakan model klasifikasi yang telah dikembangkan melalui platform Edge Impulse. Seluruh proses inferensi dilakukan secara langsung pada perangkat sehingga tidak memerlukan pengolahan data pada server eksternal dan dapat menghasilkan respons yang lebih cepat. Setelah objek berhasil diidentifikasi sebagai manusia atau hewan, hasil klasifikasi beserta informasi pendukung dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi ke Telegram Bot sehingga pengguna dapat menerima notifikasi dan memantau hasil deteksi dari jarak jauh.

B. Perancangan Alat

Berikut merupakan gambar rangkaian yang akan di buat:



Gambar 3.2 Rancangan Alat

1. Perancangan Software

Pada penelitian ini, aplikasi Telegram digunakan sebagai media utama untuk menghubungkan pengguna dengan sistem. Alasan pemilihan Telegram karena aplikasinya ringan, mudah digunakan, dan sudah menyediakan fasilitas bot yang bisa diakses melalui Telegram Bot API. Dengan fitur ini, sistem dapat dikendalikan hanya melalui chat, sehingga pengguna tidak perlu lagi membuat aplikasi tambahan yang

lebih rumit. Hal ini membuat proses monitoring maupun kontrol perangkat menjadi lebih praktis dan efisien.

2. Perancangan Hardware

Perangkat keras yang digunakan dalam sistem klasifikasi manusia dan hewan ini terdiri dari ESP32-CAM WROVER, sensor radar LD2410C, serta sumber daya listrik 5V yang stabil. ESP32-CAM WROVER berfungsi sebagai pusat pengolahan data sekaligus perangkat akuisisi citra, karena modul ini sudah dilengkapi dengan kamera OV2640 dan prosesor dual-core yang mendukung pemrosesan machine learning secara langsung. Radar LD2410C digunakan sebagai sensor tambahan untuk mendeteksi kehadiran manusia maupun hewan, sehingga sistem tetap dapat bekerja meskipun kondisi pencahayaan rendah atau objek tidak terlihat jelas oleh kamera.

Koneksi antar komponen dilakukan dengan menghubungkan radar LD2410C ke ESP32-CAM melalui jalur komunikasi UART. Pin TX radar dihubungkan ke RX ESP32 (GPIO12), dan sebaliknya RX radar dihubungkan ke TX ESP32 (GPIO15). Kamera OV2640 sudah terintegrasi pada modul ESP32-CAM sehingga tidak memerlukan wiring tambahan. Semua komponen mendapatkan suplai daya dari sumber 5V yang stabil, karena ESP32-CAM cukup sensitif terhadap fluktuasi tegangan.

Secara keseluruhan, sistem bekerja dengan alur sebagai berikut: radar LD2410C mendeteksi kehadiran objek dan mengirimkan data jarak ke ESP32-CAM, kemudian kamera mengambil citra visual untuk diproses oleh model klasifikasi Edge Impulse. Hasil klasifikasi berupa label manusia atau hewan ditampilkan melalui serial monitor atau dikirimkan langsung ke pengguna melalui Telegram Bot API sebagai notifikasi real-time. Dengan rancangan ini, perangkat keras mendukung integrasi penuh antara sensor, kamera, dan sistem komunikasi IoT.

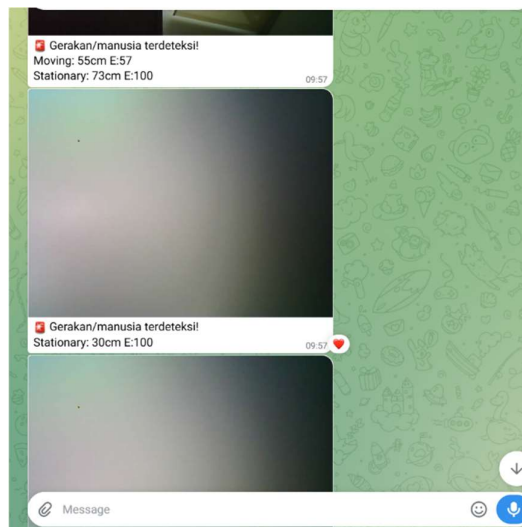
Pengambilan data dilakukan secara langsung di lokasi pengujian untuk memastikan bahwa model klasifikasi dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan sebenarnya, seperti pencahayaan, sudut pandang, dan variasi pergerakan objek.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. HASIL IMPLEMENTASI

Implementasi sistem klasifikasi manusia dan hewan berbasis ESP32-CAM WROVER dan sensor radar LD2410C berhasil dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak secara menyeluruh. Proses dimulai dari radar LD2410C yang mendeteksi keberadaan objek di area pemantauan. Data deteksi tersebut kemudian dikirimkan melalui jalur komunikasi UART ke ESP32-CAM WROVER sebagai pemicu pengambilan citra. Kamera OV2640 yang terpasang pada ESP32-CAM kemudian menangkap gambar objek dan memprosesnya menggunakan model klasifikasi yang telah dilatih melalui Edge Impulse.

Model klasifikasi yang di-*deploy* ke ESP32-CAM mampu berjalan secara real-time dengan latensi rendah. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat berdaya rendah seperti ESP32-CAM tetap dapat menjalankan inferensi *machine learning* secara stabil. Hasil klasifikasi berupa label “manusia” atau “hewan” ditampilkan melalui serial monitor dan secara otomatis dikirimkan ke pengguna melalui Telegram Bot API. Notifikasi yang diterima pengguna tidak hanya berupa teks, tetapi juga dapat dilengkapi dengan foto hasil tangkapan kamera, sehingga memberikan bukti visual yang memperkuat hasil deteksi.



Gambar 4.1 Hasil Implementasi

B. ANALISA IMPLEMENTASI

Hasil pengujian menunjukkan beberapa poin penting:

1. Efisiensi energi: Kamera hanya aktif ketika radar mendeteksi objek, sehingga mengurangi konsumsi daya.
2. Akurasi lebih tinggi: Integrasi radar dan kamera meningkatkan keandalan klasifikasi pada berbagai kondisi lingkungan.
3. Respon cepat: Proses inferensi dilakukan langsung di perangkat tanpa server eksternal, sehingga latensi rendah.
4. Relevansi data: Pengambilan data di tempat pengujian memastikan model bekerja sesuai kondisi nyata.
5. Kemudahan monitoring: Notifikasi melalui Telegram memungkinkan pengguna memantau sistem dari jarak jauh secara real-time.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem klasifikasi manusia dan hewan berbasis ESP32-CAM WROVER dan sensor radar LD2410C dengan dukungan Edge Impulse serta integrasi Telegram Bot API yang mampu bekerja secara real-time, efisien, dan memberikan notifikasi jarak jauh kepada pengguna. Integrasi kamera dan radar terbukti meningkatkan akurasi klasifikasi dibandingkan penggunaan kamera tunggal, terutama pada kondisi pencahayaan rendah atau objek yang tidak terlihat jelas, sementara pengambilan data langsung di lokasi pengujian menjadi faktor penting agar model dapat beradaptasi dengan kondisi nyata. Sistem ini menunjukkan potensi besar untuk diterapkan pada aplikasi smart home, keamanan, maupun monitoring satwa dengan biaya rendah dan fleksibilitas tinggi. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar dataset diperluas dengan pengambilan data di berbagai lokasi dan kondisi lingkungan, model klasifikasi dioptimalkan agar lebih efisien pada perangkat berdaya rendah, serta integrasi multi-sensor dan pengujian skala besar dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem.

DAFTAR REFERENSI

AI-Thinker. (2017). ESP32-Cam Module. *AI-Thinker Technology*, 1–4.

- Alfonso, I., Garcés, K., Castro, H., & Cabot, J. (2021). Self-adaptive architectures in IoT systems: a systematic literature review. *Journal of Internet Services and Applications*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13174-021-00145-8>
- Banbury, C., Reddi, V. J., Torelli, P., Holleman, J., Jeffries, N., Kiraly, C., Montino, P., Kanter, D., Ahmed, S., Pau, D., Thakker, U., Torrini, A., Warden, P., Cordaro, J., Di Guglielmo, G., Duarte, J., Gibellini, S., Parekh, V., Tran, H., ... Xuesong, X. (2021). MLPerf Tiny Benchmark. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Chang, Y. H., Wu, F. C., & Lin, H. W. (2025). Design and Implementation of ESP32-Based Edge Computing for Object Detection. *Sensors*, 25(6). <https://doi.org/10.3390/s25061656>
- Choudhary, A. (2024). Internet of Things: a comprehensive overview, architectures, applications, simulation tools, challenges and future directions. In *Discover Internet of Things* (Vol. 4, Issue 1). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00084-3>
- Firdaus, F., Wibowo, M., Tullah, R., & Ricesa, W. (2025). Studi Perbandingan Algoritma YOLO dan FOMO untuk Object Detection pada Perangkat ESP32-CAM. *Insect (Informatics and Security): Jurnal Teknik Informatika*, 11(1), 44–54. <https://doi.org/10.33506/insect.v11i1.4289>
- Herwandi, A., Ramadhan, A. A., Sunggono, N. T., & Ferawati, F. (2025). Analisis Kinerja ESP32-CAM Dalam Mendeteksi Objek. *Bit-Tech*, 7(3), 1014–1021. <https://doi.org/10.32877/bt.v7i3.2296>
- Hymel, S., Banbury, C., Situnayake, D., Elium, A., Ward, C., Kelcey, M., Baaijens, M., Majchrzycki, M., Plunkett, J., Tischler, D., Grande, A., Moreau, L., Maslov, D., Beavis, A., Jongboom, J., & Reddi, V. J. (2023). *Edge Impulse: An MLOps Platform for Tiny Machine Learning*. <http://arxiv.org/abs/2212.03332>
- Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
- Kurniawan, S., Sani, A., & Budiana, B. (2025). *Analisa penggunaan ESP32-Cam dan Platform Edge Lingkungan Industri*. 06(03).
- Lombardi, M., Pascale, F., & Santaniello, D. (2021). Internet of things: A general overview between architectures, protocols and applications. *Information (Switzerland)*, 12(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/info12020087>
- Nowroz, S. T., Saleh, N. M., Shakur, S., Banerjee, S., & Amsaad, F. (2025). *A Benchmark Reference for ESP32-CAM Module*. <http://arxiv.org/abs/2505.24081>
- Putri, Z., Sani, A., & Budiana, B. (2025). *Kajian Penggunaan ESP32-CAM dengan Platform Edge*. 06(03).
- Warden, P., & Situnayake, D. (2019). *TinyML Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers PREVIEW OF FIRST SIX CHAPTERS Buy the full book at tinymmlbook.com*.