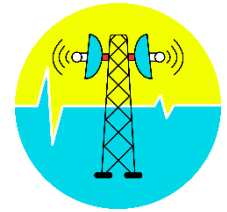




TELNECT

Journal homepage: <http://ejournal-purwakarta.upi.edu/telnect/>



State-of-the-Art Review: Teknologi Edge-AI dan IoT untuk Keamanan Sistem Smart Parcel Drop Box pada Last-Mile Delivery

Mahlida Aulia^{1*}, Budi Styawan²

^{1,2} Teknologi Rekayasa Komputer Jaringan, Politeknik Negeri Tanah Laut, Indonesia

*Corresponding Author: E-mail: mahlidaaulia23@mhs.politala.ac.id

ABSTRACTS	ARTICLE INFO
<p>Pertumbuhan pesat e-commerce di Asia Tenggara memperburuk tantangan pengiriman jarak terakhir (last-mile delivery), memunculkan masalah kritis seperti pencurian paket (porch piracy) dan kelemahan autentikasi satu arah. Penelitian ini menggunakan metodologi State-of-the-Art Review, mengkaji publikasi 2022-2025 dari Scopus, IEEE Xplore, dan Google Scholar dengan kata kunci smart parcel box, Edge-AI IoT, ESP32-S3 barcode, dan last-mile delivery security. Enam studi primer dipilih untuk perbandingan mendalam. ESP32-S3 dengan akselerasi instruksi vektor dan PSRAM 8 MB merupakan platform tertanam paling mutakhir untuk TinyML, mendukung software-based barcode decoding. Verifikasi resi dua arah dengan Firebase dan Flutter merupakan arsitektur paling canggih untuk manajemen multi-kurir. Perkembangan mutakhir mengarah pada sistem berbasis Edge-AI yang tangguh secara luring. Kesenjangan signifikan ada pada logika One Time Access, validasi load cell, dan privasi notifikasi</p>	<p>Article History: Received 23 June 2026 Revised 24 June 2026 Accepted 28 June 2026 Available online 30 June 2026</p> <hr/> <p>Keyword: Edge-AI, ESP32-S3, smart parcel box, last-mile delivery, keamanan IoT, TinyML</p>

1. PENDAHULUAN

Transformasi digital yang dipicu oleh meluasnya penggunaan platform e-commerce di Asia Tenggara telah mendorong lonjakan volume pengiriman paket secara eksponensial. Penetrasi internet yang kini mencapai 96,8% dari total populasi menjadi katalisator utama pergeseran perilaku belanja masyarakat dari toko fisik menuju kanal daring [1]. Namun, di balik pertumbuhan tersebut, fase last-mile delivery masih menjadi titik paling tidak efisien dalam rantai pasok global, berkontribusi sekitar 28% dari total biaya logistik dan menjadi sumber masalah kronis bagi kurir maupun penerima paket [2].

Masalah paling signifikan muncul ketika kurir tiba di alamat pengiriman sementara penerima tidak berada di rumah. Kondisi ini memaksa kurir meninggalkan paket di area publik yang tidak aman, meningkatkan risiko pencurian paket (porch piracy) dan kerusakan akibat cuaca tropis [3]. Sebagai respons, berbagai peneliti mengembangkan solusi Smart Parcel Drop Box berbasis Internet of Things (IoT), namun sebagian besar masih menghadapi keterbatasan teknis mendasar, terutama pada aspek autentikasi resi yang masih bersifat satu arah dan rentan terhadap pemalsuan barcode [4].

Perkembangan mutakhir dalam bidang embedded AI, khususnya kemunculan mikrokontroler ESP32-S3 dengan instruksi akselerasi vektor dan PSRAM besar, membuka peluang baru untuk melakukan inferensi Machine Learning langsung di perangkat (Edge-AI). Kemampuan ini berpotensi mengeliminasi ketergantungan pada modul pemindai hardware eksternal yang mahal sekaligus meningkatkan ketahanan sistem saat koneksi internet terputus [5]. Oleh karena itu, diperlukan suatu tinjauan komprehensif terhadap kondisi teknologi paling mutakhir (state-of-the-art) di bidang ini guna mengidentifikasi solusi terbaik yang ada dan celah riset yang masih perlu ditangani.

Artikel ini bertujuan untuk memetakan dan menganalisis perkembangan terkini teknologi Edge-AI dan IoT yang relevan dengan perancangan sistem Smart Parcel Drop Box yang aman, efisien, dan ekonomis. Kajian ini menggunakan metode State-of-the-Art Review yang berfokus pada publikasi 1–3 tahun terakhir (2022–2025) untuk memastikan relevansi teknologi yang dikaji dengan kondisi saat ini [6]. Kontribusi utama artikel ini adalah peta komprehensif kemampuan platform ESP32-S3 untuk Edge-AI, perbandingan arsitektur verifikasi resi dua arah, serta identifikasi kesenjangan riset yang menjadi landasan pengembangan sistem smart parcel drop box generasi berikutnya.

2. METODE PENELITIAN

2.1 DASAR TEORI

Bagian ini memaparkan konsep-konsep fundamental yang mendasari State-of-the-Art Review yang dilakukan, mencakup Internet of Things dalam konteks logistik, Edge-AI pada perangkat tertanam, serta teknologi verifikasi berbasis kamera.

1. Internet of Things dalam Logistik Paket

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma di mana objek fisik dilengkapi dengan sensor, aktuator, dan konektivitas jaringan untuk saling bertukar data secara otonom [7]. Dalam ekosistem logistik, IoT memungkinkan setiap titik kontak fisik, mulai dari gudang hingga pintu rumah penerima, untuk terhubung dalam satu jaringan data yang real-time. Platform cloud seperti Firebase Real-time Database memungkinkan latensi sinkronisasi data kurang dari 3 detik, menjadikannya tulang punggung sistem smart parcel box modern [8].

2. Edge-AI dan TinyML pada Perangkat Tertanam

Edge-AI atau kecerdasan buatan di tingkat tepi jaringan merujuk pada eksekusi model Machine Learning secara lokal di perangkat sumber data, tanpa mengirimkan data mentah ke server cloud [9]. TinyML adalah varian Edge-AI yang dioptimasi untuk mikrokontroler dengan memori dan daya komputasi terbatas. Teknik kuantisasi model seperti TensorFlow Lite for Microcontrollers memungkinkan model klasifikasi citra beroperasi pada perangkat dengan memori flash di bawah 4 MB [5]. Penerapan TinyML pada sistem smart box memberikan keuntungan berupa latensi rendah, konsumsi daya yang efisien, dan kemampuan beroperasi saat koneksi internet terputus (offline resilience).

3. Mikrokontroler ESP32-S3 sebagai Platform Edge-AI

ESP32-S3 adalah System-on-Chip (SoC) dari Espressif yang secara khusus dirancang untuk aplikasi AIoT. Dibandingkan dengan ESP32 standar, ESP32-S3 memiliki instruksi akselerasi AI (PIE vector instructions) yang meningkatkan throughput komputasi hingga 3x untuk operasi matrix multiplication yang umum digunakan dalam inferensi Neural Network [5]. Dukungan PSRAM eksternal hingga 8 MB memungkinkan buffer frame kamera dan model ML termuat secara bersamaan di memori, menjadikannya platform ideal untuk software-based barcode decoding dan deteksi objek secara simultan.

4. Verifikasi Resi Dua Arah

Mekanisme verifikasi resi dua arah (two-way receipt verification) bekerja dengan cara melakukan perbandingan silang antara data input fisik dari kurir (nomor resi yang dipindai) dengan basis data yang telah didaftarkan terlebih dahulu oleh pemilik melalui aplikasi mobile [4]. Konsep ini berakar dari prinsip challenge-response authentication dalam kriptografi, di mana akses hanya diberikan apabila kedua pihak mengonfirmasi validitas transaksi. Penerapannya pada sistem smart box secara efektif menutup celah barcode substitution fraud yang menjadi kelemahan utama sistem satu arah.

2.2 METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode State-of-the-Art Review, yaitu tinjauan yang berfokus secara eksklusif pada penemuan dan teknologi paling terkini dalam suatu bidang, umumnya dibatasi pada publikasi 1–3 tahun terakhir, untuk melihat posisi teknologi saat ini dan mengidentifikasi tren yang sedang berkembang [6]. Berbeda dengan Systematic Literature Review yang menggunakan protokol PRISMA yang kaku, State-of-the-Art Review lebih fleksibel dan berorientasi pada pembaruan pengetahuan praktis.

1. Sumber Data dan Strategi Pencarian

Pencarian dilakukan pada tiga basis data ilmiah utama: Scopus, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Rentang waktu publikasi dibatasi pada Januari 2022 hingga Juni 2025 guna memastikan relevansi teknologi yang dikaji. Kata kunci yang digunakan adalah ('smart parcel box' OR 'smart drop box') AND ('Edge-AI' OR 'TinyML' OR 'ESP32') AND ('barcode verification' OR 'IoT security' OR 'last-mile delivery'). Bahasa publikasi dibatasi pada Inggris dan Indonesia.

2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Artikel diinklusi apabila memenuhi seluruh kriteria berikut: (1) diterbitkan antara 2022–2025; (2) membahas implementasi atau prototipe sistem penerimaan paket otonom; (3) melibatkan komponen IoT atau embedded AI; dan (4) menyertakan hasil pengujian kuantitatif. Artikel dieksklusi apabila: (1) hanya bersifat konseptual tanpa validasi eksperimental; (2) fokus pada logistik skala warehouse tanpa konteks residensial; atau (3) tidak tersedia dalam versi teks lengkap.

3. Proses Seleksi dan Ekstraksi Data

Dari total 28 artikel yang ditemukan melalui pencarian awal, 14 artikel dieksklusi pada tahap screening judul dan abstrak, dan 8 artikel dieksklusi setelah pembacaan teks penuh karena tidak memenuhi kriteria inklusi. Enam artikel yang tersisa ditetapkan sebagai korpus utama tinjauan ini. Data yang diekstraksi dari setiap artikel mencakup: platform hardware yang digunakan, metode verifikasi resi, arsitektur database, parameter keamanan yang diuji, serta keterbatasan yang dilaporkan.

4. Kerangka Analisis Komparatif

Analisis dilakukan menggunakan kerangka komparatif tujuh dimensi: (1) platform mikrokontroler, (2) metode autentikasi, (3) kapabilitas Edge-AI, (4) arsitektur cloud/database, (5) dukungan multi-kurir, (6) validasi fisik paket, dan (7) mekanisme notifikasi. Setiap studi dinilai berdasarkan ketujuh dimensi tersebut untuk mengidentifikasi posisi teknologi terkini dan kesenjangan yang masih ada.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil analisis terhadap enam studi mutakhir yang dipilih, diikuti oleh sintesis komparatif dan identifikasi kesenjangan riset yang menjadi dasar rancangan sistem Smart Parcel Drop Box yang diusulkan.

3.1 Peta Teknologi Mutakhir Smart Parcel Box (2022-2025)

Pada Tabel 1 dirangkum perbandingan enam studi mutakhir yang menjadi acuan tinjauan ini. Enam studi tersebut merepresentasikan beragam pendekatan arsitektur, mulai dari sistem berbasis Arduino dengan pemindai hardware eksternal hingga implementasi Raspberry Pi dengan kamera pengolah citra berbasis cloud.

TABEL 1. PERBANDINGAN STUDI MUTAKHIR SMART PARCEL BOX (2022-2025)

No	Studi	Platform	Metode Auth	Edge-AI	Multi-Kurir
1	<i>Simatupang et al. [4] (2025)</i>	Arduino Uno + ESP32-CAM + GM66	Barcode scan 1 arah	<i>Tidak</i>	Tidak
2	<i>Airlangga Diputra et al. [10] (2025)</i>	Raspberry Pi 3B + Webcam	Foto wajah + COD manual	<i>Tidak</i>	Tidak
3	<i>Jonathan et al. [11] (2025)</i>	ESP32 + MQTT + PostgreSQL	Token sesi via MQTT	<i>Tidak</i>	Parsial
4	<i>Ashari et al. [8] (2023)</i>	ESP32-CAM + Firebase + Fuzzy	QR code + klasifikasi status	<i>Tidak</i>	Tidak
5	<i>Sri Widodo et al. [12] (2025)</i>	ESP32 + Load Cell + Blynk	Foto kurir + berat paket	<i>Tidak</i>	Tidak
6	<i>Nor Azam et al. [3] (2025)</i>	Raspberry Pi + Node-RED + Telegram	Telegram Bot API	<i>Tidak</i>	Tidak

Berdasarkan data pada Tabel 1, terlihat jelas bahwa tidak satu pun dari enam studi mutakhir tersebut mengimplementasikan kapabilitas Edge-AI pada perangkat utama. Seluruh sistem yang dikaji masih mengandalkan pemindai hardware eksternal, koneksi cloud real-time yang stabil, atau notifikasi melalui platform pihak ketiga. Ini menunjukkan bahwa implementasi Edge-AI untuk decoding resi secara mandiri di perangkat tertanam merupakan celah riset yang paling signifikan dalam bidang ini.

3.2 Analisis Kapabilitas ESP32-S3 sebagai Platform Edge-AI Terkini

Kajian terhadap literatur teknis menunjukkan bahwa ESP32-S3 merepresentasikan lompatan kualitas yang signifikan dibandingkan platform pendahulunya. Pengujian oleh Edge AI Specialist [5] mengonfirmasi bahwa instruksi PIE (Processor Instruction Extensions) pada ESP32-S3 mampu meningkatkan throughput operasi multiply-accumulate hingga 3,4x dibandingkan ESP32 standar pada frekuensi clock yang sama. Kemampuan ini krusial untuk operasi konvolusi dalam model Convolutional Neural Network (CNN) yang digunakan dalam deteksi objek dan klasifikasi citra.

Lebih lanjut, dukungan PSRAM eksternal hingga 8 MB pada ESP32-S3 DevKit memungkinkan simultaneous loading antara frame buffer kamera resolusi VGA (307.200 byte) dan model TinyML terkompresi (biasanya 200–500 KB setelah kuantisasi int8). Kondisi ini secara teknis memungkinkan pipeline pemrosesan Edge-AI yang utuh: deteksi kedatangan kurir oleh model klasifikasi, dilanjutkan aktivasi modul decoding barcode, tanpa memori overflow [5]. Platform ini juga mendukung Wi-Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 5.0 LE secara simultan, memungkinkan sinkronisasi data ke Firebase sekaligus komunikasi lokal dengan perangkat mobile.

3.3 Perkembangan Metode Verifikasi Resi: Dari Satu Arah ke Dua Arah

Tinjauan terhadap evolusi metode autentikasi pada smart parcel box menunjukkan perkembangan yang jelas dari pendekatan satu arah menuju dua arah. Sistem generasi pertama, seperti yang dikembangkan oleh Ashari et al. [8], hanya memindai QR code pada resi tanpa memvalidasi apakah nomor tersebut memang terdaftar oleh pemilik. Celah ini membuat sistem rentan terhadap barcode substitution fraud, di mana pelaku dapat mencetak ulang barcode dari resi paket lain untuk mendapatkan akses.

Verifikasi dua arah yang diusulkan dalam penelitian ini mengatasi kelemahan tersebut dengan menambahkan lapisan validasi dari sisi pemilik. Proses cross-verification antara data yang dipindai kurir dan database Firebase milik pemilik rumah menciptakan mekanisme yang setara dengan two-factor authentication pada sistem keamanan siber [4]. Penggunaan Firebase Real-time Database sebagai backbone, yang terbukti mencapai latensi sinkronisasi sekitar 3 detik dalam kondisi jaringan normal [8], memastikan validasi berlangsung hampir secara instan dari perspektif pengguna.

3.4 Identifikasi Kesenjangan Riset dan Tren Masa Depan

Berdasarkan sintesis menyeluruh terhadap enam studi yang dikaji, teridentifikasi tiga kesenjangan riset utama yang membentuk peta jalan pengembangan sistem smart parcel box generasi berikutnya. Ketiga kesenjangan tersebut disajikan pada Tabel 2.

TABEL 2. IDENTIFIKASI KESENJANGAN RISET UTAMA SMART PARCEL BOX

No	Kesenjangan Riset	Kondisi Saat Ini	Solusi yang Diusulkan
1	<i>Tidak ada Edge-AI pada platform utama</i>	Semua studi menggunakan pemindai hardware eksternal atau cloud API	TinyML berbasis ESP32-S3 dengan software decoding barcode 1D/2D
2	<i>Keamanan akses multi-kurir belum ada</i>	Tidak ada sistem One Time Access per nomor resi	Logika sesi dinamis: setiap nomor resi hanya berlaku untuk satu siklus akses
3	<i>Validasi integritas fisik paket minim</i>	Hanya 1 dari 6 studi menggunakan sensor berat	Kombinasi load cell 20 kg + sensor ultrasonik untuk validasi berat dan kapasitas

Dari Tabel 2 terlihat bahwa ketiga kesenjangan tersebut saling berkaitan dan membentuk satu arsitektur sistem yang komprehensif. Penerapan Edge-AI pada ESP32-S3 memungkinkan eliminasi modul pemindai eksternal sekaligus mendukung offline resilience. Logika One Time Access per nomor resi menjamin keamanan akses multi-kurir tanpa ketergantungan pada manajemen kunci fisik atau PIN yang statis. Sementara itu, validasi berat melalui load cell memberikan lapisan keamanan fisik yang mencegah penipuan paket kosong, sebuah modus yang belum ditangani oleh mayoritas studi yang dikaji.

Tren masa depan yang teridentifikasi dari analisis ini mengarah pada tiga arah perkembangan: pertama, miniaturisasi model AI menuju on-device inference yang semakin efisien; kedua, integrasi langsung dengan API ekspedisi untuk otomatisasi registrasi resi tanpa input manual; dan ketiga, penerapan teknologi enkripsi end-to-end pada komunikasi antara box dan aplikasi mobile untuk menggantikan ketergantungan pada platform notifikasi pihak ketiga yang rentan terhadap kebocoran data transaksi.

4. SIMPULAN

State-of-the-Art Review terhadap teknologi smart parcel box dalam rentang 2022–2025 ini menghasilkan tiga temuan utama. Pertama, tidak satu pun dari enam studi yang dikaji mengimplementasikan Edge-AI secara native pada perangkat utama, menjadikan software-based barcode decoding via ESP32-S3 sebagai kontribusi kebaruan yang signifikan dan belum tertangani dalam literatur mutakhir. Kedua, verifikasi resi dua arah yang mengintegrasikan data pradaftar pemilik dengan input pemindaian di lapangan merupakan evolusi keamanan yang krusial untuk menutup celah barcode substitution fraud, namun belum diimplementasikan secara penuh oleh studi manapun yang ditemukan. Ketiga, logika manajemen akses multi-kurir berbasis sesi dinamis dan One Time Access per nomor resi merupakan konsep yang secara teoritis telah diidentifikasi namun belum tervalidasi secara eksperimental dalam konteks pengiriman residensial.

Implikasi dari tinjauan ini bagi pengembangan sistem Smart Parcel Drop Box selanjutnya adalah keharusan untuk membangun tiga pilar arsitektur secara bersamaan: (1) pilar kecerdasan tepi (Edge-AI) untuk pemrosesan otonom dan ketahanan luring; (2) pilar keamanan verifikasi dua arah yang menghubungkan pemilik, kurir, dan sistem secara simetris; dan (3) pilar validasi fisik melalui sensor berat dan ultrasonik untuk memastikan integritas transaksi. Ketiga pilar ini secara bersama-sama mendefinisikan standar minimum bagi sistem smart parcel drop box generasi berikutnya yang aman, mandiri, dan dapat diandalkan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Budi Styawan, S.Kom., M.Kom. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan arahan dan dukungan dalam penyusunan artikel ini. Penulis juga berterima kasih kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer Jaringan, Politeknik Negeri Tanah Laut, atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademis yang kondusif.

6. REFERENSI

- [1] N. A. Zarin and S. Z. K. Mon, 'Smart Parcel Receiver Box,' Politeknik Sultan Salahuddin Abdul Aziz Shah, 2025.
- [2] T. T. Huong, 'Smart Locker - A Sustainable Urban Last-Mile Delivery Solution: Benefits and Challenges in Implementing in Vietnam,' 2020.
- [3] N. Azam et al., 'Collaborative Smart Dropbox System for Parcel Management,' 2025.
- [4] F. Simatupang et al., 'IoT-Based Package Drop Box System Using Arduino Uno and ESP32-CAM,' Vol. 08, No. 03, 2025.
- [5] Edge AI Specialist, 'ESP32-S3 AI Acceleration Features and Performance Benchmarks,' 2024.
- [6] A. Grant and A. Booth, 'A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies,' Health Info. Libr. J., vol. 26, no. 2, pp. 91-108, 2009.
- [7] A. Abi Aufa et al., 'Internet of Things Applications in Logistics and Supply Chain,' 2025.
- [8] I. F. F. Ashari and A. Ayuningtyas, 'Package Receiver Box Based on IoT Using Fuzzy Mamdani and Mobile Application,' JITK, vol. 8, no. 1, pp. 56-64, 2023.
- [9] K. Dokic et al., 'TinyML Edge Inference for Embedded Vision Systems,' 2025.
- [10] M. N. A. Diputra et al., 'Desain dan Implementasi Kotak Pintar (Kopin.COD) Penerima Paket COD dan Paket Non COD Berbasis IoT,' 2025.
- [11] M. Jonathan et al., 'Development of Smart Locker System with Simultaneous User Access Capabilities for Warehouse Package Handovers,' J. Appl. Sci. Adv. Eng., vol. 3, no. 1, pp. 1-6, 2025.
- [12] S. Widodo and D. Harto, 'Rancang Bangun Smartbox Penerimaan Paket Cash On Delivery Dan Monitoring Kapasitas Berbasis Internet Of Things,' 2025.
- [8] Z. Shen, "Colour differentiation in digital images," Victoria University of Technology, 2003