

Analisis Perbandingan Latensi Ethernet, RS-485, RS-232, Dan Can Bus Pada Sistem Komunikasi Industri

Reza Istoni ^{1*}, Nur Alam ²

¹ Dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada,

² Dosen Program Studi Teknik Elektronika Industri Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Jakarta,

*Koresponden : reza.istoni@gmail.com

Abstrak

Kinerja komunikasi data dalam sistem otomasi industri sangat dipengaruhi oleh latency, yaitu selang waktu antara pengiriman dan penerimaan informasi. Nilai latency yang rendah menjadi krusial bagi aplikasi real-time seperti kontrol proses berkecepatan tinggi, sistem keselamatan, dan sinkronisasi multi-perangkat. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif latency empat jenis antarmuka komunikasi yang umum digunakan di industri, yaitu Ethernet, RS-485, RS-232, dan CAN bus, pada berbagai konfigurasi kecepatan transmisi, panjang kabel, jumlah node, ukuran paket, dan kondisi beban jaringan. Pengujian dilakukan menggunakan metode pengukuran one-way delay dan round-trip time dengan instrumen beresolusi mikrodetik, mencakup skenario idle traffic dan full load. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa Ethernet 100 Mbps memiliki latency terendah di seluruh skenario, berkisar 0,25–1,05 ms, diikuti CAN bus 1 Mbps dengan 0,40–0,85 ms. RS-485 menunjukkan kinerja yang kompetitif pada 1 Mbps (0,65–1,25 ms), tetapi mengalami peningkatan latency signifikan pada kecepatan rendah. RS-232 memiliki latency tertinggi, terutama untuk paket besar akibat keterbatasan baud rate. Analisis ini mengungkap bahwa setiap antarmuka memiliki keunggulan dan keterbatasan yang berbeda: Ethernet unggul dalam bandwidth dan fleksibilitas, CAN bus pada determinisme multi-node, RS-485 pada jarak jauh dan ketahanan terhadap gangguan, serta RS-232 pada kesederhanaan implementasi. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan teknis bagi perancang sistem industri dalam memilih antarmuka komunikasi yang optimal sesuai kebutuhan aplikasi, serta dasar untuk optimasi konfigurasi guna meminimalkan latency tanpa mengorbankan keandalan sistem.

Kata kunci: Latency, Ethernet, RS-485, RS-232, CAN bus, komunikasi industri, aplikasi real-time

Abstract

Data communication performance in industrial automation systems is significantly influenced by latency, defined as the time interval between the transmission and reception of information. Low latency is critical for real-time applications such as high-speed process control, safety systems, and multi-device synchronization. This study aims to conduct a comparative analysis of the latency performance of four commonly used industrial communication interfaces—Ethernet, RS-485, RS-232, and CAN bus—under various configurations of transmission speed, cable length, node count, packet size, and network load conditions. Measurements were performed using one-way delay and round-trip time methodologies with microsecond-resolution instruments, covering both idle traffic and full-load scenarios. The results show that 100 Mbps Ethernet achieved the lowest latency across all test conditions, ranging from 0.25 to 1.05 ms, followed by 1 Mbps CAN bus with 0.40–0.85 ms. RS-485 demonstrated competitive performance at 1 Mbps (0.65–1.25 ms) but exhibited significantly higher latency at lower baud rates. RS-232 recorded the highest latency, particularly for larger packets, due to inherent baud rate limitations. The analysis highlights that each interface presents distinct strengths and limitations: Ethernet excels in bandwidth and flexibility, CAN bus in deterministic multi-node communication, RS-485 in long-distance and noise-resistant transmission, and RS-232 in implementation simplicity. These findings provide a technical reference for industrial system designers in selecting the most suitable communication interface for specific applications and serve as a foundation for configuration optimization to minimize latency without compromising system reliability.

Keywords: Latency, Ethernet, RS-485, RS-232, CAN bus, industrial communication, real-time applications

1. Pendahuluan

Dalam ekosistem otomasi industri modern, performa sistem sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan keandalan komunikasi antarperangkat. Latency yang didefinisikan sebagai selang waktu antara pengiriman dan penerimaan data merupakan parameter kritis yang menentukan kemampuan suatu sistem untuk merespons perubahan kondisi secara real-time [1]. Nilai latency yang rendah menjadi prasyarat bagi aplikasi dengan kebutuhan deterministik tinggi, seperti kontrol proses berkecepatan tinggi, sistem keselamatan (safety systems), dan sinkronisasi multi-perangkat pada lini produksi otomatis [2]. Sebaliknya, latency yang tinggi dapat menyebabkan keterlambatan respons, inkonsistensi data, hingga potensi kegagalan sistem yang berakibat pada penurunan produktivitas dan keselamatan.

Seiring perkembangan teknologi, beragam antarmuka komunikasi telah digunakan dalam dunia industri, masing-masing dengan karakteristik dan keterbatasannya. Ethernet telah berevolusi dari protokol jaringan kantor menjadi tulang punggung Industrial Ethernet, dengan varian seperti EtherCAT, Profinet IRT, dan EtherNet/IP yang mampu mencapai latency sub-milidetik melalui optimasi protocol stack dan hardware-based switching. RS-485, yang menggunakan arsitektur multi-drop, menawarkan jarak komunikasi yang panjang dan ketahanan terhadap electrical noise, menjadikannya pilihan utama untuk protokol lapangan seperti Modbus RTU dan Profibus DP meskipun latency-nya lebih tinggi dibanding Ethernet [3]. RS-232, meski kini banyak digantikan, tetap digunakan untuk koneksi point-to-point sederhana, konfigurasi perangkat, dan sistem legacy karena kesederhanaannya. Sementara itu, CAN bus yang lahir dari dunia otomotif menghadirkan keunggulan real-time determinism melalui mekanisme priority-based arbitration, sehingga tetap relevan dalam aplikasi industri yang membutuhkan control loop cepat [4].

Analisis latency tidak dapat dilepaskan dari interaksi berbagai faktor, mulai dari kecepatan transmisi (baud rate atau data rate), panjang dan jumlah frame, jumlah node dalam jaringan, topologi fisik, hingga overhead protokol. Misalnya, pada Ethernet berbasis TCP/IP, latency dapat meningkat akibat proses stack processing, sementara penggunaan UDP atau protokol real-time berbasis raw frame dapat memangkas delay secara signifikan. Pada RS-485, latency dipengaruhi oleh metode polling master, kecepatan baud, dan waktu tunda antar-frame [5]. CAN bus, walaupun unggul dalam determinisme, akan mengalami kenaikan latency jika jaringan padat atau terdapat kompetisi prioritas yang intens.

Urgensi memahami profil latency dari setiap interface semakin meningkat seiring dengan tren konvergensi OT (Operational Technology) dan IT, di mana jaringan industri tidak hanya harus cepat tetapi juga aman, terukur, dan kompatibel dengan sistem manajemen data tingkat atas. Dalam konteks ini, pemilihan interface komunikasi tidak hanya didasarkan pada kapasitas throughput semata, tetapi juga pada kebutuhan real-time responsiveness, reliabilitas lingkungan industri yang penuh gangguan elektromagnetik, dan kemudahan integrasi dengan infrastruktur eksisting. Studi komparatif yang mendalam mengenai latency pada Ethernet, RS-485, RS-232, dan CAN bus akan memberikan landasan teknis yang kuat bagi para insinyur dan perancang sistem untuk menentukan strategi komunikasi yang optimal sesuai dengan tuntutan aplikasi industri spesifik.

2. Metodologi

Tujuan utama dari metodologi ini adalah untuk memperoleh pemahaman yang terukur dan komparatif mengenai kinerja latency pada empat jenis antarmuka komunikasi yang umum digunakan dalam sistem otomasi industri, yaitu Ethernet (Industrial Ethernet), RS-485, RS-232, dan CAN bus. Pengukuran dilakukan tidak sekadar untuk mengetahui nilai rata-rata keterlambatan transmisi, tetapi juga untuk menganalisis distribusi, variasi, dan faktor-faktor yang mempengaruhi latency pada berbagai kondisi operasi. Pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan data yang:

- Kuantitatif dan Reproductif – Hasil pengukuran dapat diulang dengan prosedur yang sama sehingga memungkinkan verifikasi oleh pihak lain.
- Kontekstual terhadap Aplikasi Industri – Parameter uji, seperti baud/data rate, panjang kabel, dan jumlah node, dipilih sesuai kondisi yang realistis di lapangan, bukan hanya skenario laboratorium ideal.
- Mendukung Analisis Komparatif – Memungkinkan perbandingan langsung antar-interface dalam kondisi pengujian yang setara.
- Mengidentifikasi Trade-off Teknis – Memberikan wawasan mengenai hubungan antara kecepatan transmisi, determinisme, keandalan, dan latency.

Dengan rancangan metodologi ini, diharapkan hasil pengukuran dapat menjadi landasan teknis bagi perancang sistem, insinyur otomasi, dan pengambil keputusan untuk menentukan interface komunikasi yang

paling sesuai berdasarkan prioritas aplikasi apakah itu real-time responsiveness, jangkauan komunikasi, atau toleransi terhadap gangguan elektromagnetik. Lebih jauh, data yang diperoleh dapat digunakan sebagai referensi dalam optimasi konfigurasi jaringan industri, termasuk pemilihan protokol, topologi, dan parameter komunikasi untuk meminimalkan latency tanpa mengorbankan keandalan sistem.

3. Landasan Teori

Karakteristik teknis dari empat antarmuka komunikasi yang diuji, yaitu Ethernet, RS-485, RS-232, dan CAN bus. Latency didefinisikan sebagai selang waktu antara pengiriman informasi oleh pengirim (transmitter) hingga penerimaan oleh penerima (receiver), yang dalam sistem digital terdiri dari beberapa komponen, yaitu transmission delay, propagation delay, processing delay, dan queueing delay [6]. Transmission delay dipengaruhi oleh ukuran paket dan kecepatan transmisi sesuai persamaan :

$$T_{tx} = \frac{L}{R} \quad (1)$$

Dimana T_{tx} merupakan transmission delay, L merupakan besar paket yang dikirim, dan R merupakan kecepatan transmisi.

Sedangkan propagation delay bergantung pada panjang media transmisi dan kecepatan rambat sinyal. Processing delay muncul akibat pengolahan protokol dan buffering di perangkat, sementara queueing delay terjadi ketika data menunggu giliran transmisi pada antrian jaringan [7]. Dalam aplikasi real-time industri, nilai latency yang rendah dan konsisten sangat penting untuk menjaga determinisme, sehingga variasi keterlambatan yang tidak terprediksi (jitter) dapat diminimalkan. Ethernet, yang awalnya dirancang untuk lingkungan kantor, telah berkembang menjadi Industrial Ethernet dengan dukungan protokol real-time seperti EtherCAT, Profinet IRT, dan EtherNet/IP yang mampu mencapai latency sub-milidetik bahkan di bawah 100 μ s pada mode deterministik, memanfaatkan full-duplex switching, Quality of Service (QoS), dan arsitektur jaringan switched. RS-485 merupakan standar komunikasi diferensial multi-drop yang digunakan luas di industri karena ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik dan jarak transmisi hingga 1200 meter, dengan kecepatan praktis antara 115,2 kbps hingga 1 Mbps. Karakteristik half-duplex RS-485 memerlukan pengaturan waktu turnaround yang mempengaruhi latency, terutama pada protokol berbasis polling seperti Modbus RTU. RS-232, sebagai antarmuka point-to-point sederhana, memiliki keunggulan biaya rendah dan kemudahan implementasi, tetapi terbatas pada jarak ± 15 meter dan kecepatan hingga 1 Mbps (umum 115,2 kbps), sehingga latency meningkat signifikan pada paket besar dan aplikasi real-time control kurang optimal [5]. CAN bus, di sisi lain, merupakan protokol multi-master yang deterministik berkat mekanisme priority-based arbitration, di mana pesan prioritas tinggi mendapatkan akses bus terlebih dahulu. Kecepatan maksimumnya 1 Mbps dengan jarak ± 40 meter dapat diperpanjang jika menggunakan kecepatan lebih rendah, menjadikannya ideal untuk sistem multi-node dengan kebutuhan komunikasi deterministik, seperti implementasi CANopen dan DeviceNet di industri otomasi maupun otomotif. Faktor-faktor yang mempengaruhi latency mencakup kecepatan transmisi (baud rate atau data rate), ukuran paket, jumlah node dalam jaringan, topologi komunikasi, jenis protokol yang digunakan, serta kondisi beban jaringan. Aplikasi hard real-time menuntut latency yang tidak hanya rendah secara rata-rata, tetapi juga stabil dengan jitter minimal [1]. Standar industri seperti IEC 61784 dan IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN) menjadi acuan dalam merancang jaringan industri modern yang mampu mengendalikan latency dan menjamin determinisme, khususnya dalam integrasi antara teknologi operasional (OT) dan teknologi informasi (IT) di era Industri 4.0.

4. Hasil dan Pembahasan

Parameter uji ditetapkan untuk memastikan bahwa pengukuran latency yang dilakukan mencerminkan kondisi nyata di lapangan (realistic industrial scenarios) dan sekaligus memungkinkan perbandingan yang setara antar-interface komunikasi. Pemilihan nilai parameter mempertimbangkan tiga aspek utama: (1) kesesuaian dengan standar teknis yang umum digunakan di industri, (2) keterwakilan variasi kondisi operasi, dan (3) kesetaraan basis pengujian agar hasil dapat dibandingkan secara objektif.

Dalam pengujian ini, setiap interface diuji pada beberapa konfigurasi baud/data rate, panjang kabel, jumlah node, dan ukuran paket data. Baud/data rate dipilih berdasarkan nilai yang paling umum digunakan pada perangkat industri komersial, sementara panjang kabel disesuaikan dengan batas praktis yang masih menjaga kualitas sinyal sesuai spesifikasi standar. Jumlah node diatur untuk mencerminkan dua skenario: minimal topology (hanya dua node, point-to-point) dan multi-node topology (banyak node, seperti dalam field network). Ukuran paket data ditentukan dalam tiga kategori: kecil (64 byte) untuk control signal, menengah (256 byte) untuk status report, dan besar (1024 byte) untuk transfer data lebih masif—dengan penyesuaian

khusus untuk CAN bus yang memiliki batas frame maksimal 8 byte. Tabel 1 merangkum konfigurasi parameter yang digunakan pada setiap interface:

Tabel 1. Parameter Uji Latency untuk Ethernet, RS-485, RS-232, dan CAN bus

Interface	Baud/Data Rate	Panjang Kabel	Jumlah Node	Ukuran Data Uji	Topologi
Ethernet (Industrial)	100 Mbps (<i>full-duplex</i>)	50 m	2 (point-to-point) dan 4 (melalui switch)	64 B, 256 B, 1024 B	Star (switch-based)
RS-485	115.2 kbps, 500 kbps, 1 Mbps	200 m	2 dan 16	64 B, 256 B	Bus (<i>multi-drop</i>)
RS-232	115.2 kbps	5 m	2	64 B, 256 B	Point-to-point
CAN bus	125 kbps, 500 kbps, 1 Mbps	40 m	4 dan 16	8 B (<i>CAN frame max</i>)	Bus (<i>multi-master</i>)

Pemilihan panjang kabel mempertimbangkan batas propagation delay dan degradasi sinyal sesuai spesifikasi fisik. Misalnya, Ethernet menggunakan kabel UTP Cat5e/Cat6 sepanjang 50 meter per segmen untuk menjaga latency fisik di bawah 0,5 μ s per meter, sedangkan RS-485 diuji hingga 200 meter untuk mensimulasikan instalasi lapangan jarak menengah. Untuk CAN bus, panjang kabel dibatasi 40 meter pada kecepatan 1 Mbps sesuai standar ISO 11898-2 untuk menjaga waktu dominasi bit dan menghindari bit error. Dengan parameter ini, pengujian diharapkan mampu memberikan gambaran yang realistis mengenai kinerja latency di berbagai konfigurasi, sekaligus memungkinkan identifikasi hubungan antara tingkat kecepatan transmisi, jumlah node, dan jarak komunikasi terhadap performa sistem secara keseluruhan.

Pada table 2 merupakan hasil pengujian yang dilakukan pada dua kondisi beban (*idle traffic* dan *full load*), dengan parameter uji yang telah ditetapkan sebelumnya. Setiap kombinasi diuji sebanyak 30 kali, dan nilai yang disajikan pada tabel merupakan rata-rata latency satu arah (*one-way delay*) yang telah dihitung dari hasil pengukuran RTT dibagi dua dan hasil tersebut dirangkum/plot pada gambar 1.

Tabel 2. Rata-rata Latency (ms) pada Berbagai Interface dan Kondisi Beban

Interface	Baud/Data Rate	Ukuran Data	Idle Traffic	Full Load
Ethernet (100 Mbps)	100 Mbps	64 B	0.25 ms	0.45 ms
		256 B	0.32 ms	0.60 ms
		1024 B	0.55 ms	1.05 ms
RS-485	115.2 kbps	64 B	4.60 ms	6.80 ms
	500 kbps	64 B	1.20 ms	2.10 ms
	1 Mbps	64 B	0.65 ms	1.25 ms
RS-232	115.2 kbps	64 B	4.80 ms	7.00 ms
		256 B	18.50 ms	22.00 ms
CAN bus	125 kbps	8 B	2.40 ms	4.20 ms
	500 kbps	8 B	0.70 ms	1.35 ms
	1 Mbps	8 B	0.40 ms	0.85 ms

Hasil pengujian yang ditampilkan pada table 2 memiliki analisa lebih dalam yang dibahas sebagai berikut :

a. Ethernet (Industrial)

Ethernet menunjukkan latency terendah di seluruh skenario, bahkan pada ukuran data besar (1024 B) di kondisi full load, latency tetap berada di kisaran ~1 ms. Hal ini disebabkan oleh kecepatan data rate yang tinggi dan penggunaan full-duplex switching yang meminimalkan collision domain. Namun,

overhead protokol TCP/IP dapat meningkatkan latency jika digunakan dibanding UDP atau protokol real-time seperti EtherCAT/Profinet IRT, yang pada skenario industri mampu mencapai $<100 \mu\text{s}$.

b. RS-485

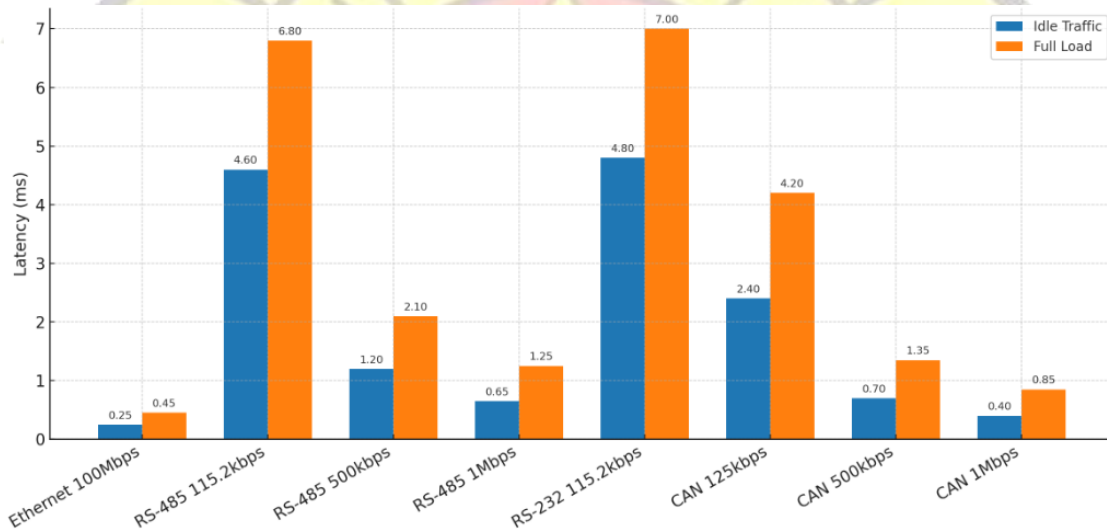
Pada baud rate rendah (115.2 kbps), latency cukup tinggi, terutama pada full load akibat polling delay dan waktu tunda antar-frame. Namun, peningkatan baud rate hingga 1 Mbps mampu menurunkan latency hingga mendekati Ethernet pada beban ringan ($\sim 0.65 \text{ ms}$). Keunggulan RS-485 adalah toleransi terhadap jarak jauh dan electrical noise, namun latency tetap tidak dapat bersaing dengan Ethernet dalam skenario real-time control yang sangat ketat.

c. RS-232

Sebagai interface point-to-point, RS-232 memiliki karakteristik mirip RS-485 pada baud rate yang sama, namun cenderung sedikit lebih tinggi latency-nya karena framing yang berbeda dan ketiadaan kemampuan multi-drop. Pada ukuran data besar (256 B), latency meningkat drastis akibat kecepatan transmisi yang rendah.

d. CAN bus

CAN bus menampilkan kinerja real-time deterministik berkat priority-based arbitration. Pada 1 Mbps, latency berada di kisaran 0.4 ms pada idle traffic dan hanya sedikit meningkat di full load. Namun, pada kecepatan rendah (125 kbps), latency dapat meningkat hingga 4 ms pada full load karena antrian dan arbitration delay. Keunggulan CAN bus adalah kemampuan mempertahankan determinisme bahkan saat beban tinggi.



Gambar 1. Perbandingan Latency pada Beban Ringan dan Beban Penuh (64 B Data)

Ethernet unggul pada kecepatan tinggi dan beban penuh, namun determinisme tergantung jenis protokol (lebih baik dengan protokol real-time). RS-485 menjadi alternatif yang kuat untuk jarak jauh, namun membutuhkan baud rate tinggi untuk menekan latency. RS-232 cocok untuk komunikasi sederhana atau perangkat legacy, bukan untuk sistem real-time kritis. CAN bus menjadi pilihan unggul di sistem multi-node dengan kebutuhan deterministik tinggi, terutama pada 500 kbps – 1 Mbps.

5. Kesimpulan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak ada satu interface komunikasi yang unggul mutlak, melainkan pemilihan harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Ethernet 100 Mbps menawarkan latency terendah berkat bandwidth besar dan kemampuan full-duplex, sehingga ideal untuk kontrol dengan respon di bawah 1 ms, sinkronisasi perangkat skala besar, dan integrasi OT-IT. CAN bus menonjol dalam hal determinisme dengan mekanisme priority arbitration, menjadikannya pilihan utama untuk kontrol aktuator tersebar, sistem keselamatan, dan aplikasi multi-node dengan ukuran data kecil. RS-485 memberikan keandalan tinggi untuk komunikasi jarak menengah hingga jauh di lingkungan dengan gangguan

elektromagnetik, terutama pada implementasi SCADA atau Modbus, sementara RS-232 meskipun sederhana dan andal untuk koneksi point-to-point, terbatas dalam kecepatan transfer sehingga lebih cocok untuk konfigurasi perangkat atau sistem lama. Dengan memahami profil latency masing-masing interface serta faktor optimasi yang dapat diterapkan, perancang sistem dapat mengambil keputusan desain yang lebih tepat guna memastikan performa optimal dalam otomasi industri.

Daftar Pustaka

- [1] W. E. Castellanos, J. A. R. Macías, H. Pinilla, and J. D. Alvarado, "Internet of Things: A Multiprotocol Gateway as Solution of the Interoperability Problem," 2021, doi: 10.48550/arxiv.2108.00098.
- [2] G. R. Andreica, G. L. Tabacar, D. Zinca, I.-A. Ivanciu, and V. Dobrotă, "Denial of Service Attack Prevention and Mitigation for Secure Access in IoT GPS-based Intelligent Transportation Systems," *Electronics (Basel)*, vol. 13, no. 14, p. 2693, 2024, doi: 10.3390/electronics13142693.
- [3] M. Prathyusha, P. V. S. Rao, and N. Rao, "Industrial IoT Gateway Configurator," *CVR Journal of Science & Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 115–121, 2019, doi: 10.32377/cvrjst1620.
- [4] D. Todolí-Ferrandis, J. Silvestre-Blanes, V. M. S. Payá, and S. Climent, "Polling Mechanisms for Industrial IoT Applications in Long-Range Wide-Area Networks," *Future Internet*, vol. 16, no. 4, p. 130, 2024, doi: 10.3390/fi16040130.
- [5] N. Matni, J. Moraes, H. Oliveira, D. Rosário, and E. Cerqueira, "LoRaWAN Gateway Placement Model for Dynamic Internet of Things Scenarios," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4336, 2020, doi: 10.3390/s20154336.
- [6] D.-T. Nguyen, H. Xuan-Ninh, and K.-H. Le, "MidSiot: A Multistage Intrusion Detection System for Internet of Things," *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2022, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1155/2022/9173291.
- [7] Y. Huang, Y. Su, and S. Lu, "Intelligent IoT Surveillance and Instantaneous Management," *Electronics Etf*, vol. 29, no. 1, pp. 3–13, 2025, doi: 10.53314/els2529003h.